



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Vinh-An LE

le 28 janvier 2014

Titre :

Comportement des bétons autoplacants par temps chaud

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie civil

Unité de recherche :

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)

Directeur(s) de Thèse :

M. Michel MOURET

M. Franck CASSAGNABERE (Co-encadrant)

Jury :

Mme. Stéphanie STAQUET
M. Yannick VANHOVE
M. Tien-Tung NGO
M. Franck CASSAGNABERE
M. Michel MOURET
M. Gilles ESCADEILLAS

Rapporteur	Professeur associé Univ. Libre de Bruxelles
Rapporteur	Professeur Univ. Artois
Examineur	Maître de Conférences Univ. Cergy-Pontoise
Examineur	Maître de Conférences Univ. Toulouse
Examineur	Maître de Conférences - HDR Univ. Toulouse
Examineur	Professeur Univ. Toulouse

*A ma famille,
A mes amis,
...et à mes souvenirs de la France.*

Toulouse, 28 Janvier 2014.

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été réalisé au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de l'Université Paul Sabatier à Toulouse (UPS) et de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA), France.

Tout d'abord, je tiens à remercier M. le Professeur Gilles ESCADEILLAS, Directeur du LMDC et Mme. le Professeur Hélène ROUX- de BALMANN, Directrice de l'Ecole Doctorale MEGeP de m'avoir accueilli durant ces années.

Je voudrais adresser mes plus vifs remerciements à M. Michel MOURET et M. Franck CASSAGNABERE qui ont dirigé cette thèse. Ils ont su guider mes choix, me faire profiter de leurs connaissances et qui par leurs expériences et leurs compétences m'ont transmis leurs passions pour ce sujet.

Je souhaite ensuite exprimer ma reconnaissance à Mme. le Professeur Stéphanie STAQUET, Université Libre de Bruxelles et M. le Professeur Yannick VANHOVE, Université d'Artois qui ont accepté d'être rapporteurs de ce mémoire et je tiens sincèrement à les remercier pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Mes sincères remerciements s'adressent également à M. Tien-Tung NGO, Université de Cergy-Pontoise qui a accepté de faire partie du jury et d'évaluer mon travail.

Je tiens à remercier particulièrement à M. Thierry VIDAL pour ses conseils scientifiques et son aide très importante pour ma thèse.

Je voudrais adresser un grand merci à M. le Professeur Laurent JOLY, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE), le parrain de thèse, pour sa confiance et son encouragement pour ce travail.

Je remercie chaleureusement tous le personnel du LMDC, particulièrement à M. Bernard ATTARD, M. Marc BEGUE, M. Guillaume LAMBARE, M. David GUILLOUSET, M. Pierre NICOT et M. Frédéric REAU pour leur soutien ainsi que leur aide.

J'exprime aussi mes sincères remerciements à tous mes amis au LMDC, mes amis Vietnamiens à Toulouse pour tous les moments agréables que j'ai partagés avec eux. Je garde au fond de mon cœur des souvenirs inoubliables.

Un très grand merci à mes parents, mes beaux-parents, mes sœurs, qui m'ont toujours soutenu et encouragé pendant tout au long du séjour loin de la famille.

En fin, une grand pensée du fond du cœur à ma femme, Mai Anh, et mon fils, Anh Quân, qui sont toujours à côté de moi pendant ces trois années de la thèse.

AUTEUR : M. Vinh An LE

TITRE : Comportement des bétons autoplacants par temps chaud.

DIRECTEUR DE THESE : M. Michel MOURET, Maître de Conférences - HDR, Université de Toulouse, France.

CO-ENCADRANT : M. Franck CASSAGNABERE, Maître de Conférences, Université de Toulouse, France.

RESUME

L'autoplacement, ou aptitude du béton frais à s'écouler sous l'effet de la gravité et sans apport extérieur d'énergie (vibration), est obtenue en utilisant un plus grand nombre de constituants, comparativement aux bétons traditionnels vibrés, notamment des additions minérales et au moins une addition chimique de type superplastifiant. La complexité des interactions entre les constituants conduisant à l'autoplacement a été antérieurement démontrée et maîtrisée à la température du laboratoire. L'objectif de ce travail est de caractériser l'autoplacement dans des conditions de température telles qu'elles prévalent en situation de temps chaud et de regarder quelles sont les conséquences de ces conditions thermiques sur les propriétés à l'état durci du béton.

Le programme expérimental permet de reproduire en laboratoire les conditions d'un bétonnage par temps chaud, à la fois lors de la confection du mélange et lors de la maturation des éprouvettes de contrôle habituellement réalisées sur chantier. Les paramètres de l'étude sont donc la température initiale du béton, les moyens de maintenir l'autoplacement obtenue à la température de 20°C (ajout d'eau ou surdosage en superplastifiant), la conservation des éprouvettes et la formulation des bétons.

Les résultats obtenus montrent que les moyens de maintenir l'autoplacement à température initiale élevée n'induisent pas de variations significatives de la compacité du béton. Il en résulte des propriétés à l'état durci identiques ou meilleures que celles mesurées à 20°C. La conservation des éprouvettes à une température élevée durant les premières 24 heures simulant des conditions non normalisées n'altère pas les propriétés. Une analyse plus fine prenant en compte la maturité, la compacité et les caractéristiques de l'hydratation (quantités d'hydrates et cinétique) permet de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser une matrice à forte teneur en filler calcaire.

Finalement, les résultats viennent confirmer ceux relevés dans la littérature, à savoir que les effets d'une température élevée ne sont pas aussi préjudiciables sur les propriétés du BAP que sur celles des bétons traditionnels vibrés. Pour autant, les recommandations existantes lors d'un bétonnage par temps chaud doivent toujours être considérées ; leur respect permet en effet d'éviter une

déformation différée excessive sous chargement, observée dans cette étude pour le BAP incorporant un liant ternaire (clinker, filler calcaire et laitier) lorsqu'il est confectionné et mûri à températures élevées.

MOTS-CLES :

Béton autoplaçant ; liants binaire et ternaire ; température ; maturité ; résistance ; durabilité.

ABSTRACT

The self-compacting ability, or ability of the fresh concrete to flow under the effect of gravity without external energy (vibration) is obtained by using more components in comparison with conventional vibrated concrete, including mineral additions and at least one chemical addition of superplasticizer types. The complex interactions between these components leading to the self-compactibility has been previously demonstrated and controlled at the temperature conditions in the laboratory. The objective of this work is to characterize the self-compactibility in temperature conditions prevalent in hot weather situation and to know what are the consequences of these thermal conditions on the properties of the cured concrete.

The experimental program reproduced in the laboratory the conditions of hot weather concreting, during the preparation of the mixture and the maturation of control specimens which are usually done on site. The study parameters are the initial temperature of the concrete, the means to maintain the self-compacting ability obtained at a temperature of 20°C (addition of water or overdose of superplasticizer), the conservation of specimens and the concrete design.

The obtained results show that the means to maintain the self-compatibility at high initial temperature does not induce significant changes in the concrete compactness. As a result, the properties in the hardened state are equal or better than those measured at 20°C. Conservation of specimens at a high temperature during the first 24 hours which simulates non-standard conditions does not alter the properties. A more detailed analysis taking into account the maturity, the compactness and the characteristics of hydration (amount of hydrates and kinetics) allows highlighting the advantages of using a matrix with a high content of limestone filler.

Finally, the results confirm some literature data and show that the effects of high temperature on the properties of BAP are not as detrimental as those obtained on conventional vibrated concrete. However, the existing recommendations for hot weather concreting should always be considered, and the respect of these recommendations makes it possible to avoid excessive delayed strain under loading observed in the case of the BAP incorporating a ternary binder (clinker, limestone filler and slag) when mixed and matured at high temperature.

KEYWORDS:

Self-compacting concrete ; binary and ternary binders; temperature ; maturity; strength ; durability.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre 1: Etude bibliographie	5
----------------------------------------------	----------

1. GENERALITES.....	7
1.1 LE BETON AUTOPLAÇANT (BAP).....	7
1.2 LE TEMPS CHAUD.....	7
1.2.1 Définition.....	7
1.2.2 Facteurs climatiques à prendre en compte	9
1.2.3 Bilan.....	10
2. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LES PROPRIETES DU BAP	10
2.1 TEMPERATURE INITIALE AU MALAXAGE.....	10
2.1.1 Etat frais.....	10
2.1.2 Effet de la température initiale du BAP à l'état durci	16
2.2 TEMPERATURE DE MURISSEMENT	17
2.2.1 Propriétés mécaniques instantanées	18
2.2.2 Propriétés mécaniques différées.....	21
2.2.3 Propriétés de transport et durabilité	25
2.2.4 Microstructure.....	31
3. CONCLUSION	32

Chapitre 2: Matériaux et méthodes	35
------------------------------------------------	-----------

1. LES CONSTITUANTS DE BASE	38
1.1. CIMENTS	38
1.2. FILLER CALCAIRE	39
1.3. SUPERPLASTIFIANT.....	40
1.4. PHASE GRANULAIRE	41
2. FORMULATIONS DES BETONS ET DES PÂTES.....	41
2.1. FORMULATION DES BETONS.....	42
2.2. FORMULATION DES PATES	45

3. METHODE EXPERIMENTALE : DE LA PREPARATION DES CONSTITUANTS A LA CONSERVATION DES EPROUVETTES	45
3.1. PREPARATION DES CONSTITUANTS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE INITIALE DU BETON	45
3.2. MALAXAGE ET MAINTIEN DE L'AUTOPLAÇANCE A TEMPERATURE INITIALE ELEVEE	46
3.3. ESSAIS A L'ETAT FRAIS	47
3.3.1. <i>Etalement [NF EN 12350-8]</i>	47
3.3.2. <i>Boite en L [NF EN 12350-10]</i>	48
3.3.3. <i>Stabilité au tamis [NF EN 12350-11]</i>	49
3.3.4. <i>Masse volumique apparente [NF EN 12350-6] et teneur en air [NF EN 12350-7]</i>	50
3.3.5. <i>Teneur en eau du béton</i>	50
3.3.6. <i>Séquence d'essai</i>	51
3.4. CONSERVATION DES EPROUVETTES	51
3.4.1. <i>Conservation durant les premières 24 heures</i>	51
3.4.2. <i>Conservation entre les premières 24 heures et l'échéance d'essai</i>	52
3.5. DENOMINATION DES BETONS ET DES PATES	52
4. CARACTERISATION A L'ETAT DURCI	53
4.1. ESSAIS MECANQUES	53
4.1.1. <i>Résistance mécanique à la compression</i>	53
4.1.2. <i>Module d'élasticité</i>	53
4.1.3. <i>Mesures des déformations de retrait</i>	54
4.1.4. <i>Mesures des déformations de fluage</i>	55
4.2. ESSAIS PHYSICO – CHIMIQUES ET DURABILITE	57
4.2.1. <i>Porosité accessible à l'eau</i>	57
4.2.2. <i>Absorption d'eau</i>	58
4.2.3. <i>Perméabilité aux gaz</i>	58
4.2.4. <i>Migration des ions chlorures</i>	60
4.2.5. <i>Analyses thermiques</i>	61

Chapitre 3: Validation de l'autoplaçance à température élevé durant le malaxage	66
1. INTRODUCTION	68
2. RESULTATS DES ESSAIS D'OUVRABILITE	68
2.1. MAINTIEN DE L'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS ET AJOUTS ASSOCIES D'EAU OU DE SUPERPLASTIFIANT	69
2.2. ECOULEMENT A LA BOITE EN L	71
2.3. STABILITE AU TAMIS	72
2.4. EVOLUTION DES PROPRIETES D'OUVRABILITE DANS LE TEMPS LORSQUE LA TEMPERATURE DU MELANGE INITIAL EST DE 50°C	73

2.5	BILAN	74
3.	VARIATION DES COMPOSITIONS AVEC L'ELEVATION DE LA TEMPERATURE INITIALE ET DES MOYENS DE MAINTENIR L'AUTOPLACANCE.....	74
3.1	TENEUR EN AIR	74
3.2	EAU REELLEMENT CONTENUE.....	74
3.3	BILAN	76

Chapitre 4: Résultats des essais mécaniques instantanés78

1.	INTRODUCTION	80
2.	RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION A 1 JOUR, 7 JOURS ET 28 JOURS.....	80
2.1	TEMPERATURE INITIALE AU MALAXAGE ET ACTIONS POUR MAINTENIR L'AUTOPLACANCE	80
2.2	TEMPERATURE DE CONSERVATION DES EPROUVETTES DURANT LES PREMIERES 24 HEURES.....	82
3.	MODULE SECANT A LA COMPRESSION A 28 JOURS.....	84
4.	BILAN.....	85

Chapitre 5: Analyse des variations de résistance en fonction de la compacité du béton frais et de l'histoire des températures – pistes d'interprétations physico-chimiques87

1.	INTRODUCTION: PRINCIPE GENERAL DE L'ANALYSE.....	89
2.	OUTILS D'ANALYSE	90
2.1	CONCEPT DE TEMPS EQUIVALENT A 20°C : PRISE EN COMPTE DE LA MATURITE	90
2.2	RELATION DE FERET : DETERMINATION DE L'EVOLUTION DES RESISTANCES.....	90
2.2.1	Courbe de référence d'évolution des résistances.....	91
2.2.2	Résistances corrigées des bétons à la compacité de référence	95
3.	RESULTATS.....	96
3.1	QUELLE EXPRESSION DE LA COMPACITE POUR L'ANALYSE DES RESULTATS?	96
3.2	CAS DE BAP1.....	96
3.3	CAS DE BAP2.....	99
3.4	CAS DE BAP3.....	99
3.5	BILAN	102
4.	PISTES D'INTERPRETATION	103
4.1	ANALYSES POUR LE COMPORTEMENT DE BAP1	104

4.2	ANALYSES POUR LE COMPORTEMENT DE BAP2 ET BAP3.....	106
4.3	LES APPORTS DE LA LITTÉRATURE	109
4.3.1	A court terme (1 jour)	109
4.3.2	A plus long terme (28 jours)	110
4.3.3	L'effet du filler calcaire.....	111
4.4	HYPOTHESES SUR LES MODIFICATIONS DE LA MICROSTRUCTURE	111
4.4.1	Le développement de l'hydratation en présence de filler.....	112
4.4.2	L'auréole de transition	112
4.4.3	L'effet de l'adjuvantation.....	113
4.5	BILAN.....	114

Chapitre 6: Influence du temps chaud sur les propriétés de durabilité et différées du BAP

116

1.	IMPACT SUR LES INDICATEURS DE DURABILITE	118
1.1	INTRODUCTION SUR LA DURABILITE	118
1.2	POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU	118
1.3	ABSORPTION D'EAU	119
1.4	PERMEABILITE A L'OXYGENE	120
1.5	DIFFUSION DES IONS CHLORURE. ESSAI DE MIGRATION	123
1.6	TENEUR EN PORTLANDITE	124
1.7	SYNTHESE ET DISCUSSION SUR DES CRITERES DE DURABILITE	125
2.	IMPACT SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DIFFEREES.....	128
2.1	AVANT-PROPOS	128
2.2	LE RETRAIT.....	129
2.3	LE FLUAGE SPECIFIQUE	130
2.4	PISTES D'EXPLICATION.....	131
3.	CONCLUSIONS SUR LES EVOLUTIONS DE PROPRIETES MECANIQUES DIFFEREES ET DE DURABILITE DES BAP CONFECTIONNES ET MURIS PAR TEMPS CHAUD	135

Conclusion générale et perspectives

137

INTRODUCTION GENERALE

1. CONTEXTE GENERAL DE LA THESE

La qualité du béton peut être altérée par une température ambiante élevée, ce qui se traduit d'abord par une augmentation de la température du béton frais. Les conséquences de cette élévation de la température du béton frais sont bien connues :

- la demande en eau est plus importante pour maintenir l'ouvrabilité visée,
- les difficultés de mise en place, de serrage et de finition sont accrues en raison de la perte rapide de l'ouvrabilité par évaporation et d'un temps de prise fortement raccourci,
- la tendance à la fissuration plastique augmente.

L'addition d'eau peut être un réflexe pour supprimer les difficultés décrites à l'état frais. Mais, pour le béton vibré, l'addition d'eau est le plus souvent mal contrôlée et cause des problèmes bien reconnus aux états durcissant et durci :

- le retrait au séchage est accru ainsi que la fissuration thermique,
- les résistances mécaniques sont plus faibles,
- la durabilité est amoindrie.

L'utilisation des Bétons autoplaçants (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années. Les BAPs se différencient des bétons traditionnels vibrés, notamment par leurs propriétés à l'état frais. La composition des BAPs se caractérise par un volume élevé de pâte (ciment + additions minérale et chimique + eau) et un volume faible de granulats, ce qui limite les frottements intergranulaires. Un BAP incorporera alors une quantité élevée de fines et une quantité d'eau relativement faible. La fluidité souhaitée sera atteinte en introduisant des additions chimiques telles que les superplastifiants. Compte tenu du nombre plus important de constituants et implicitement de la complexité des interactions entre ces constituants, la principale interrogation qui se pose est de savoir si les températures qui prévalent en situation de temps chaud ont la même incidence sur les propriétés du béton autoplaçant que sur celles du béton vibré.

2. CADRE, OBJECTIFS ET CONTENU DE LA THESE

Dans le contexte industriel en période estivale, les fabricants de béton prêt à l'emploi peuvent être confrontés à des baisses de résistances mécaniques sur des bétons d'usage courant à partir d'essai sur éprouvettes de contrôle.

Mouret [MOU97] a montré dans son travail de thèse que si les recommandations qui définissent les règles d'usage pour minimiser les effets préjudiciables du temps chaud sur les bétons traditionnels vibrés étaient respectées, il n'y avait pas de désordres observés sur les propriétés d'usage, aux états frais et durcis. Il montrait par là même que ces recommandations étaient suffisantes et justifiées. En est-il de même pour les BAP ?

Le présent travail s'inscrit donc dans la continuité de celui de Mouret, dans le contexte des éprouvettes de contrôle réalisées à la livraison d'un BAP sur chantier en conditions de temps chaud. Un premier objectif est de quantifier dans ces conditions et par comparaison aux conditions de référence des essais d'étude en laboratoire, les propriétés de premier ordre, liées au cahier des charges « béton », que sont l'autoplaçance et les résistances mécaniques à la compression. Dans ce cadre, le premier paramètre de l'étude est la température initiale du mélange frais. Lorsque celle-ci augmente, il est vraisemblable que l'autoplaçance visée à 20°C soit altérée et que des moyens soient nécessaires pour la rétablir. Ces moyens constituent le deuxième paramètre de l'étude. Ce paramètre sera étudié en procédant, si nécessaire, soit à des additions d'eau, soit à un surdosage en superplastifiant pour aller respectivement, soit à l'encontre, soit dans le sens des recommandations. Le troisième paramètre est la température de conservation des éprouvettes aux jeunes âges, soit dans les conditions normalisées des éprouvettes de contrôle (dans le sens des recommandations), soit dans des conditions simulant un délai à la conservation normalisée (à l'encontre des recommandations). L'ensemble de ces actions doit alors être observé, à l'état durci, sur les résistances à la compression, en faisant varier certains paramètres de composition, notamment la nature et le dosage du ciment afin de prendre en compte les évolutions actuelles à la fois technico-économiques et environnementales.

L'observation de l'évolution des résistances doit être analysée pour expliquer le comportement du BAP soumis à des températures élevées en production et en maturation. La quantification des propriétés caractérisant la tenue du béton dans le temps doit permettre de compléter et d'étayer les compréhensions posées au stade de l'analyse de l'évolution des résistances.

3. STRUCTURATION DU MEMOIRE

Outre cette introduction générale, la conclusion générale et les perspectives, le mémoire se divise en six chapitres.

L'analyse bibliographique effectuée au chapitre 1 définit le temps chaud pour mieux recentrer les paramètres de l'étude présente puis s'attache à faire plus particulièrement l'état des connaissances au sujet des effets de la température élevée sur la modification des propriétés aux états frais, durcissant et durci du béton. Une confrontation des comportements entre bétons vibrés (BV) et bétons autoplaçants (BAP) est faite autant que possible. Les causes physiques et chimiques qui

peuvent expliquer les performances des bétons (BV et BAP) dans les conditions d'élévation de la température par temps chaud sont également traitées.

Le deuxième chapitre justifie la nature des matériaux utilisés et en donne les caractéristiques principales. Ce chapitre développe également les protocoles d'essais mis en œuvre pour le programme expérimental.

Les résultats de premier ordre peuvent alors être présentés dans les chapitres 3 et 4.

Le troisième chapitre valide l'autoplaçance des bétons à l'état frais quelle que soit la température initiale au malaxage. Il fait notamment le lien entre les propriétés obtenues à l'état frais et les variations de composition inhérentes aux actions entreprises pour atteindre l'autoplaçance.

Le quatrième chapitre présente les mesures des propriétés mécaniques instantanées de résistance à la compression et de module d'élasticité. Il permet par exemple d'apprécier les évolutions de ces paramètres en fonction des paramètres d'étude, pour une échéance de mesure donnée et/ou une composition donnée.

Les résultats obtenus sur les variations de résistances sont ensuite analysés au chapitre 5. L'analyse consiste à mettre en évidence les désordres ou les améliorations de résistance autres que ceux expliqués par les variations de compacité du béton frais et les variations de maturité. Ces désordres ou améliorations sont alors interprétés sur la base d'analyses thermiques qui donnent un éclairage semi-quantitatif des caractéristiques de l'hydratation.

Le sixième et dernier chapitre vient supporter les interprétations précédentes en analysant les propriétés relatives à la tenue du matériau dans le temps : caractérisation du réseau poreux à partir d'indicateurs de durabilité (porosité accessible à l'eau, absorption d'eau par immersion, perméabilité aux gaz, migration d'espèces agressives telles que les ions chlorure) et des propriétés mécaniques différées (retrait et fluage).

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion récapitulant les principaux résultats de cette recherche et donne des perspectives à ce travail.

CHAPITRE 1

Etude bibliographique

1. GENERALITES.....	7
1.1 LE BETON AUTOPLAÇANT (BAP).....	7
1.2 LE TEMPS CHAUD.....	7
1.2.1 Définition.....	7
1.2.2 Facteurs climatiques à prendre en compte	9
1.2.3 Bilan.....	10
2. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LES PROPRIETES DU BAP	10
2.1 TEMPERATURE INITIALE AU MALAXAGE.....	10
2.1.1 Etat frais.....	10
2.1.2 Effet de la température initiale du BAP à l'état durci	16
2.2 TEMPERATURE DE MURISSEMENT	17
2.2.1 Propriétés mécaniques instantanées	18
2.2.2 Propriétés mécaniques différées.....	21
2.2.3 Propriétés de transport et durabilité	25
2.2.4 Microstructure.....	31
3. CONCLUSION	32

1. GENERALITES

1.1 Le béton autoplaçant (BAP)

Au Japon, dans les années 1980, des recherches significatives ont été effectuées afin d'éviter des conditions de compactage du béton frais non conformes aux règles de l'art et d'améliorer ainsi la durabilité des ouvrages. Ces recherches ont conduit au développement du béton autoplaçant (BAP) ou SCC (de l'anglais Self Compacting Concrete) [\[HOL05\]](#).

Le béton autoplaçant est un béton qui est caractérisé à l'état frais par une fluidité telle qu'il est capable de remplir complètement le coffrage par le seul effet de son poids propre et sans énergie de compactage supplémentaire, même en présence d'obstacles, tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport et de la mise en œuvre [\[FEB05\]](#).

Les BAPs se différencient des bétons traditionnels vibrés, notamment par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- une mobilité en milieu confiné ou non ;
- une stabilité une fois mise en place.

Pour pouvoir assurer ces caractéristiques, la composition d'un BAP diffère de celle des bétons classiques. Elle se caractérise par un volume de pâte (ciment + additions minérale et chimique + eau + air) élevé, et un volume plus faible de granulats, ce qui limite les frottements intergranulaires. Le rapport granulat/sable exprimé en masse est généralement de l'ordre de 1 pour un BAP. De plus, pour limiter le risque de blocage dans un milieu fortement ferrailé, la taille maximale des granulats est comprise entre 10 et 20 mm.

La pâte qui doit répondre à une fluidité suffisante doit en même temps minimiser le risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP incorporera alors une quantité élevée de fines et une quantité d'eau relativement faible. La fluidité souhaitée sera atteinte en introduisant des additions chimiques telles que les superplastifiants.

1.2 Le temps chaud

1.2.1 Définition

D'après le comité 305 de l'American Concrete Institute [\[ACI 305, 2010\]](#), le temps chaud est défini comme « toute combinaison d'une température élevée de l'air, d'une faible humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire, qui tend à altérer la qualité du béton frais ou durci en accélérant l'évaporation et la vitesse de l'hydratation du ciment ou, sinon, à conduire à des propriétés anormales du matériau ». Pour apporter des précisions à cette définition, [\[BER92a\]](#)

retient trois groupes de climats chauds, en se basant sur les humidités relatives (HR) moyennes des régions concernées :

- climat chaud et humide ($HR \geq 85\%$),
- climat chaud à humidité modérée ($50\% < HR < 65\%$),
- climat chaud et sec ($HR < 40\%$).

L'hygrométrie de l'air est en effet un paramètre qui commande la capacité d'évaporation de l'eau à partir d'une surface plane fraîchement coulée de dalle ou de plancher.

En précisant un peu plus, il est possible de distinguer deux catégories de climat où le temps chaud prévaut tout au long de l'année [MOU97].

- Climats désertiques ou sahéliens, chauds et secs, rencontrés dans des régions de l'Afrique, de l'Amérique du Nord, du Sud de l'Australie et du Moyen-Orient. Ce type de climat est caractérisé par une température diurne de 40 à 50°C, une humidité relative faible et un rayonnement solaire intense (flux moyen de chaleur supérieur à 17 MJ/m²/jour). L'aridité est aggravée par la présence de vents dont l'intensité s'accroît généralement l'après-midi. L'écart de température entre le jour et la nuit est très prononcé (15 à 20°C en moyenne, jusqu'à 35°C). Les précipitations sont faibles et très espacées.
- Climats tropicaux ou équatoriaux, chauds et humides, rencontrés en Afrique, en Asie (au Vietnam par exemple) et en Amérique du Sud. Les régions concernées sont caractérisées par des températures de 30 à 40°C le jour, une humidité relative élevée et des précipitations intenses (plus de 1500mm annuels). La variation de température entre le jour et la nuit ne dépasse pas 8 à 10°C.

En France, le temps chaud est saisonnier et il se situerait plutôt dans la première catégorie de la classification. Par exemple, à Toulouse (Haute-Garonne), les conditions de base durant l'été sont de 32°C pour la température sèche et de 35% pour l'humidité relative. Ces conditions sont plus sévères dans le bassin méditerranéen. Le temps chaud peut également se produire au printemps ou en automne [MOO87]. Ce sont des périodes de l'année où les professionnels bétonniers ne disposent que de très peu de temps pour réagir.

Il apparaît maintenant nécessaire de reprendre chaque facteur climatique cité dans cette définition. Cela nous permettra de mieux appréhender leurs effets combinés.

1.2.2 Facteurs climatiques à prendre en compte

a) *Température de l'air*

Les températures élevées dont on vient de donner des ordres de grandeur et des plages de variation selon les climats, sont le terrain favorable à l'évaporation de l'eau du béton et à sa dessiccation. Elles ont également pour effet d'accélérer la prise et le durcissement du ciment sans pour autant que les résistances à long terme soient augmentées. Cet affaiblissement mécanique avec l'élévation de la température a été largement constaté et publié sur les bétons ordinaires [MOU97]. De plus, d'importantes variations journalières peuvent induire des contraintes thermiques non négligeables, particulièrement nuisibles durant l'amorce du durcissement [F.I.P, 86].

b) *Humidité relative*

Les variations de la température de l'air impliquent celles de l'humidité relative. L'évaporation est d'autant plus forte que cette humidité est faible ; elle est à relier à la quantité d'eau que l'air peut théoriquement absorber pour atteindre sa saturation (capacité restante d'absorption d'eau de l'air [VEN77]).

c) *Vent*

L'action du vent sur le béton frais est développée par [MAM89] : « en accélérant les échanges convectifs au niveau de la surface du béton, le vent accroît la quantité d'eau évaporée ». La vitesse d'évaporation de l'eau de gâchage est donc d'autant plus élevée que celle du vent augmente. Par temps chaud, cette évaporation peut atteindre de sérieuses proportions si la vitesse du vent excède 15km/h [F.I.P, 86]. [ACI 305, 1991] rapporte une augmentation de 300% de la vitesse d'évaporation si la vitesse du vent augmente de 8 à 32km/h, tout étant égal par ailleurs.

d) *Rayonnement solaire et précipitations*

Ces deux paramètres exercent une forte influence sur la température et l'humidité relative ambiantes.

La température de l'air dépend directement du rayonnement solaire en l'absence de nébulosité et de pluie. Dans ce cas, le rayonnement direct va provoquer l'élévation de la température des matériaux de base stockés (ciment, granulats et eau).

L'ensoleillement induit également l'élévation de la température des coffrages et des cages d'armatures disposées à l'intérieur et plus généralement de tous les équipements sur chantier (dispositifs de stockage, pompes à béton, canalisation...). Le site lui-même, dans lequel se déroule le chantier, est fortement réchauffé. Il en résulte une augmentation de la température du béton frais.

Après la mise en place du béton, le rayonnement solaire direct conduit à une évaporation rapide de l'eau des surfaces en béton exposées et peut entraîner une fissuration par retrait plastique.

Par temps chaud, la nébulosité et la pluie diminuent l'effet du rayonnement solaire puisqu'elles en absorbent une partie. Il s'ensuit la diminution de la température et l'augmentation de l'humidité relative, ce qui a pour effet de limiter l'évaporation. Il faut veiller cependant à prévoir les moyens à mettre en œuvre afin d'éviter le délavage du béton qui serait mis en place lors d'un orage en France ou lors des précipitations journalières en climat équatorial ou tropical humide [MOU97].

e) Evaporation

La littérature fait ressortir que l'évaporation est le paramètre préoccupant lors du bétonnage par temps chaud et qu'elle est amplifiée sous l'action conjuguée des facteurs décrits précédemment. Elle se produit lorsque la surface de l'eau est exposée à un air non saturé [BER92b]. Dans le cas du béton frais, la surface d'eau est créée par le phénomène de ressuage.

1.2.3 Bilan

Les paramètres climatiques à considérer en situation de temps chaud sont nombreux. En y ajoutant leurs interactions, il est très difficile de pouvoir les étudier simultanément dans leur ensemble. Dans la mesure où le travail de thèse s'inscrit dans le contexte des éprouvettes de contrôle, les échanges hydriques entre le béton et le milieu extérieur sont inexistant. C'est pourquoi, dans la suite de ce chapitre, on s'attachera à reporter les études traitant de l'effet de la température (initiale lors du malaxage et de mûrissement des éprouvettes) sur les propriétés des BAP. Un parallèle avec les bétons traditionnels vibrés sera fait autant que possible pour chaque propriété étudiée.

2. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LES PROPRIETES DU BAP

2.1 Température initiale au malaxage

2.1.1 Etat frais

a) Béton vibré

Lorsque la température ambiante augmente, conduisant à une augmentation de la température du béton frais, la littérature est unanime sur le fait que la quantité d'eau doit nécessairement être augmentée pour maintenir un affaissement donné. La Figure 1.1, massivement reprise [ACI305, 1991 ; F.I.P, 86], le démontre [MOU97].

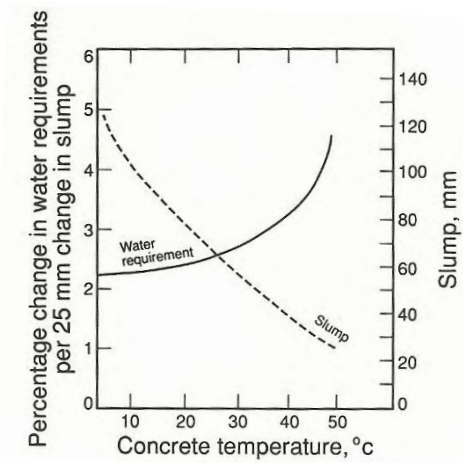


Figure 1.1 : effet de la température du béton sur l'affaissement et la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25mm (d'après [KL158], rapporté par [SOR93], [MOU97])

D'après Hampton [HAM81], l'élévation de la température ambiante de 22°C à 32°C contribue à élever celle du béton et entraîne une perte de l'affaissement, quelle que soit la gamme de consistance étudiée (figure 1.2).

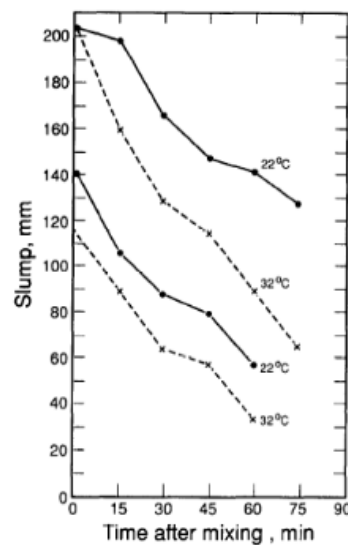


Figure 1.2 : effet de la température ambiante sur l'affaissement (de 22°C à 32°C) [HAM81]

D'après [MAM89], l'élévation de la température du béton de 22°C à 37°C entraîne une augmentation du dosage en eau de 6%, pour obtenir la consistance après 5 minutes, 9% pour obtenir la même consistance après 15 minutes (figure 1.3).

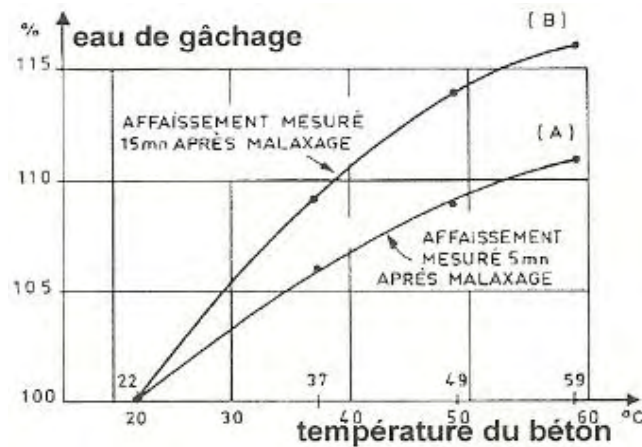


Figure 1.3 : augmentation du dosage en eau en fonction de la température du béton, à affaissement constant (8cm) [MAM89]

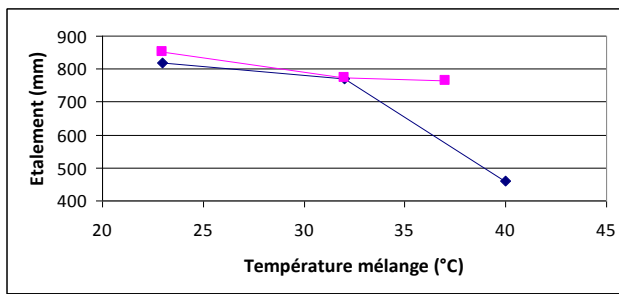
[ORR71] a effectué une expérience factorielle dans laquelle les effets de la température du ciment, de la température initiale du mélange, de la composition du ciment, du rapport eau/ciment (E/C) et des interactions entre ces facteurs ont été observés sur la consistance. Les résultats ont montré que chaque facteur pouvait être considéré séparément et que l'effet du rapport E/C était le plus important sur la consistance, devant ceux de la température initiale, de la composition du ciment et enfin, de la température du ciment.

b) Béton auto-plaçant

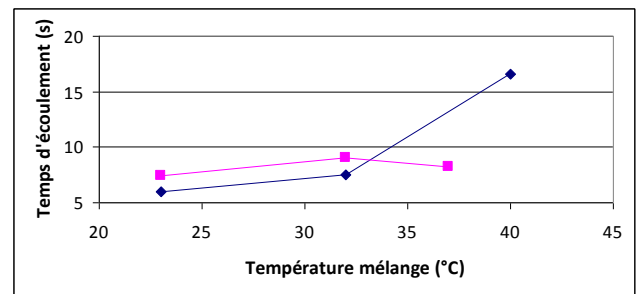
Le maintien de l'ouvrabilité nécessaire est primordial pour le béton auto-plaçant, la qualité des structures finies réalisées en BAP dépendant quasi entièrement de l'autoplaçance.

Selon Al-Abduljabbar [ABD08], les effets de la température initiale (humidité relative maintenue constante, 20% pour toutes les expériences) sur le maintien de l'autoplaçance immédiatement après le malaxage dépendent de la composition. Notamment, un rapport gravillon/sable G/S faible provoque l'altération de l'autoplaçance avec l'élévation de la température du mélange (figure 1.4). De plus, il apparaît en corollaire que, jusqu'à 30 minutes après le malaxage, les propriétés d'écoulement ne sont pas fortement altérées avec l'élévation de la température initiale, notamment pour le mélange à rapport G/S voisin de 1 (figure 1.5)

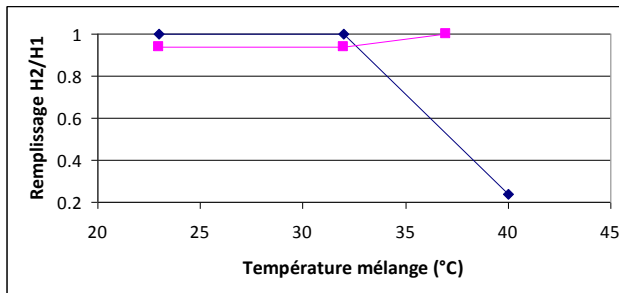
Ghafoori et al. [GHA10] montrent que l'altération de l'étalement immédiatement après le malaxage apparaît au-delà de la température de 28°C pour 3 compositions variant seulement par les dosages en superplastifiant (polycarboxylate) et en agent de viscosité (figure 1.6). Ils attribuent la perte d'ouvrabilité avec l'élévation de la température initiale à la cinétique accélérée de l'hydratation, l'adsorption plus importante de superplastifiant, la teneur réduite en humidité des granulats et l'évaporation d'eau qu'ils n'ont pas quantifiée. Ils montrent également que les surdosages en superplastifiant et éventuellement en agent de viscosité permettent de retrouver les étalements cibles.



(a)



(b)



(c)

	Mélange A (bleu)	Mélange B (rose)
OPC (kg/m ³)	408	533
Cendre volante	50	70
G/S	0,55	1,05
SP/fines (%)	0,8	0,8
Eau	177	176

Figure 1.4 : effet de la température du BAP sur l'ouvrabilité initiale : l'étalement (a), temps d'écoulement à l'entonnoir en V (b) et ratio de remplissage à la boîte en L (c) [ABD08]

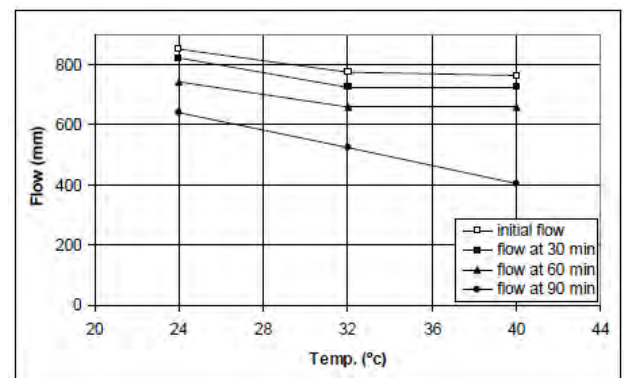
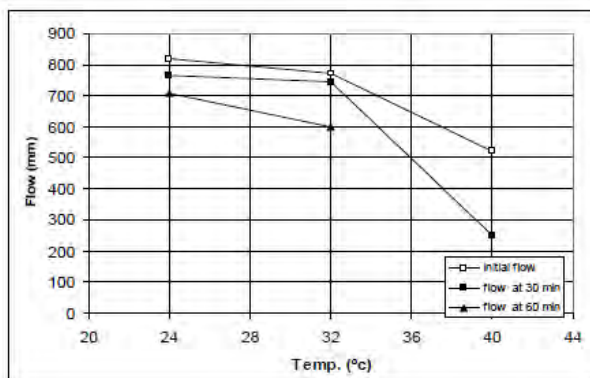
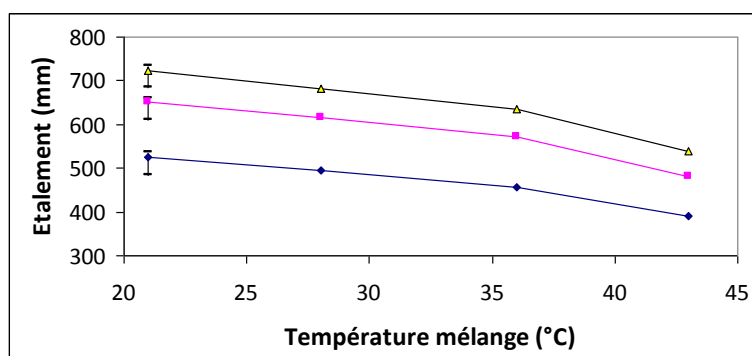


Figure 1.5 : effet de la température du BAP sur l'étalement à 0, 30, 60 et 90 minutes après le malaxage (Mélange A à gauche, Mélange B à droite) [ABD08]



Pour les 3 mélanges : OPC=391kg/m³,
cendre volante=78kg/m³, G/S=1,1,
eau/(OPC+CV)=0,40

	Mél.1	Mél.2	Mél.3
SP	0,9%	1,2%	1,4%
AV	0	0,15%	0,2%

% massique de (OPC+CV)

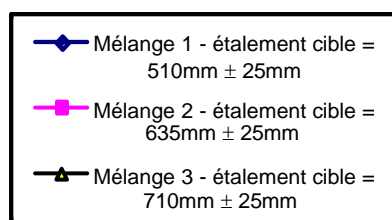


Figure 1.6 : effet de la température du BAP sur l'étalement immédiatement après le malaxage [GHA10]

A l'inverse, à partir d'une composition de BAP incorporant seulement un ciment au laitier CEM III/A comme poudre, un superplastifiant de type ester polycarboxylique, et dont le rapport G/S est inférieur à 1, le rapport E/C=0,45, [WEI10] montrent que pour maintenir l'étalement à 700mm à la fin du malaxage entre les conditions (20°C ; 60%HR) et (30°C ; 30%HR) (stockage des constituants, malaxage et essais en chambre climatique), il est nécessaire de diminuer la teneur en superplastifiant (figure 1.7). Malgré cette constatation, les auteurs n'expliquent pas ce résultat.

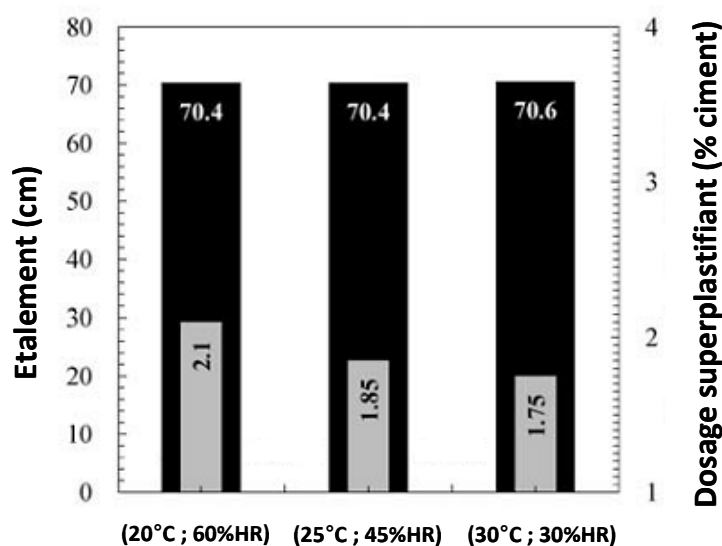


Figure 1.7 : effet de la température du BAP et des conditions ambiantes sur la quantité de superplastifiant (en gris clair) pour maintenir l'étalement (en noir) [WEI10]

En parallèle, à teneur constante en superplastifiant, ils observent que l'altération de l'écoulement (étalement) est marquée à partir des conditions (25°C ; 45%HR) et évolue de manière quasi-linéaire jusqu'à 2 heures après le malaxage. Ils attribuent cette observation à l'accroissement de la réactivité du ciment avec l'élévation de la température. Pourtant, ils observent en parallèle une diminution du temps d'écoulement à l'entonnoir entre 30 minutes et 120 minutes après le malaxage.

La nature du superplastifiant et les propriétés pour une même nature ont aussi un rôle avec la variation de la température sur l'écoulement. Petit [PET05], en postulant un modèle de Bingham à partir de mesures rhéométriques sur des BAP incorporant soit des polycarboxylates (PCP) soit des polysulfonates (PNS), tout étant égal par ailleurs, montre que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique en fin de malaxage sont peu ou pas affectés entre 20°C et 30°C lorsque le PCP est employé. En revanche, avec l'utilisation de PNS, il apparaît une légère augmentation de ces 2 paramètres, déjà entre 20°C et 25°C. L'adsorption des PNS qui agissent essentiellement par répulsion électrostatique est thermo-activée par l'élévation de la température, ce qui entraîne une quantité moindre d'adjuvant en solution. L'action supplémentaire de répulsion stérique des PCP peut expliquer leur plus grande efficacité. [PET05] montre que cette action se termine dès la phase d'accélération de l'hydratation qui, elle, se produit d'autant plus tôt que la température initiale du béton est élevée. [BRA03] montrent que l'utilisation d'esters polycarboxyliques réduit la viscosité initiale des mélanges (OPC+filler calcaire, E/C=0,55) lorsque leur température initiale s'élève de 20°C à 30°C. De plus, ils observent que, quelle que soit la température (20°C ou 30°C), le maintien de l'autoplaçance dans le temps est amélioré et que l'action stérique est plus stable lorsque le superplastifiant présente des chaînes ramifiées plus courtes.

c) Bilan

Pour les bétons traditionnels vibrés, une tendance claire se dégage quelle que soit la composition, à savoir que l'augmentation de la température initiale se traduit par une altération de l'écoulement immédiatement après le malaxage et dans le temps. Au contraire, concernant les BAP, les résultats sont plus discordants, notamment lorsque l'écoulement est caractérisé à la fin du malaxage, ce qui doit s'expliquer par le plus grand nombre de constituants présents dans le mélange, et également par les interactions entre le superplastifiant, l'addition minérale et le ciment, elles aussi forcément variables en fonction de la nature de ces constituants. Il semble que l'utilisation de ciment au laitier et/ou de superplastifiant à base de polycarboxylate ait une action positive sur le maintien de l'autoplaçance immédiatement en fin de malaxage avec l'élévation de la température initiale.

2.1.2 Effet de la température initiale du BAP à l'état durci

Les résultats qui se rapportent explicitement à la température initiale du mélange frais durant le malaxage sont peu nombreux et se concentrent sur les propriétés mécaniques instantanées telles que la résistance à la compression et le module d'élasticité. Les résultats sont en revanche plus fournis et élargis à d'autres propriétés du béton lorsqu'il s'agit d'étudier l'effet de la température de mûrissement (§ 2.2).

a) Béton vibré

[MOU97] a réalisé des bétons de classe de résistance différente (22MPa et 35MPa, ciment CEM I 42,5), confectionnés à 25°C, 30°C et 50°C. Quelle que soit la classe de résistance, il a ajouté de l'eau de manière significative (10 à 20l/m³) pour maintenir la consistance constante seulement dans le cas où la température a été portée à 50°C en raison du raidissement immédiat du béton. Les éprouvettes réalisées ont été conservées à 20°C, 100%HR. Il observe des baisses significatives de résistance à 28 jours, d'autant plus marquées que le dosage en ciment est élevé (classe du béton = 35MPa), dès la température de 30°C (figure 1.8) :

- en moyenne, de 5% et 10% entre 25°C et 30°C, de 15% à 20% entre 25°C et 50°C (classe 35MPa);
- en moyenne, de 5% à 15% entre 25°C et 50°C (classe 22MPa).

Ainsi les désordres apparaissent avec l'élévation de la température mais la température la plus élevée aggrave les défauts de résistance en raison d'une demande en eau accrue pour rétablir l'ouvrabilité.

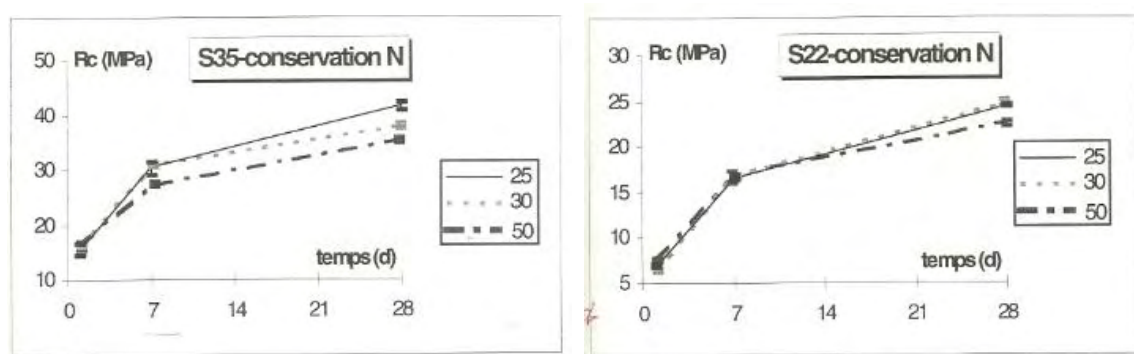


Figure 1.8 : évolution des résistances en fonction de la température initiale du béton [MOU97]

En parallèle, [MOU97] ne peut pas dégager des écarts significatifs sur le module d'élasticité, avec l'augmentation de la température initiale.

J. Ortiz et al. [ORT05] soulignent que les désordres de résistance à 28 jours sont les plus importants

lorsque l'écart est élevé entre la température initiale du béton et la température ambiante. Dans leur contexte expérimental, les auteurs n'ajoutent pas d'eau pour maintenir l'affaissement et les éprouvettes étanchéifiées subissent un cycle de température variant de 22°C à 38°C. Ils préconisent de fabriquer le béton aux dernières heures de la journée.

b) Béton autoplaçant

Al-Abduljabbar [ABD08], selon le même contexte expérimental explicité au § 2.1.2b et figure 1.4, montre que l'effet de la température initiale sur la résistance à la compression dépend de la composition. Dans le cas du mélange B dont les proportions ressemblent à celles couramment rencontrées en France, la résistance est augmentée entre 24°C et 40°C (figure 1.9). L'auteur n'explique pas ces évolutions.

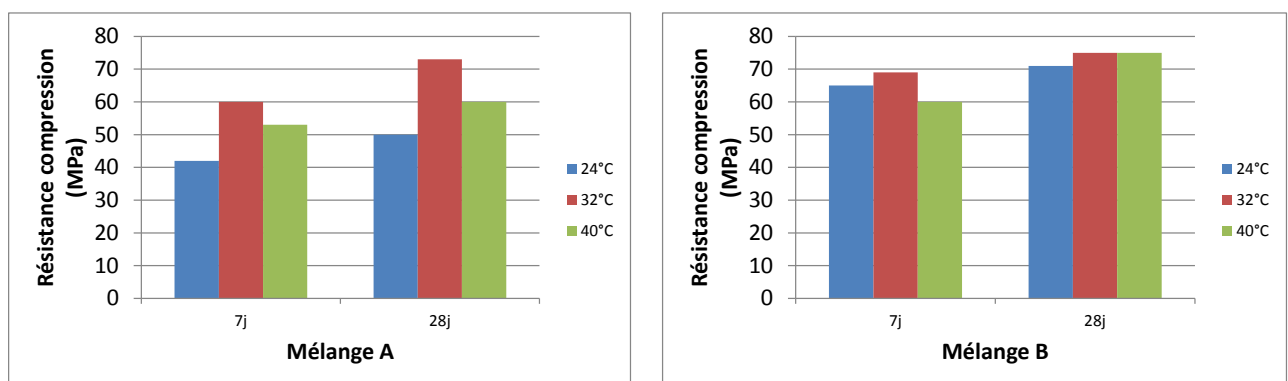


Figure 1.9 : effet de la température initiale (24°C, 32°C et 40°C) sur la résistance à la compression à 7 jours et 28 jours [ABD08]

c) Bilan

Les bétons traditionnels vibrés présentent des baisses de résistances lorsque leur température initiale augmente, qu'il y ait ou non un ajout d'eau pour maintenir la consistance. Les BAP présentent des résultats différents, encore une fois discordants en fonction de la composition : les résistances à 28 jours peuvent ne pas être affectées par l'élévation de la température initiale.

2.2 Température de mûrissement

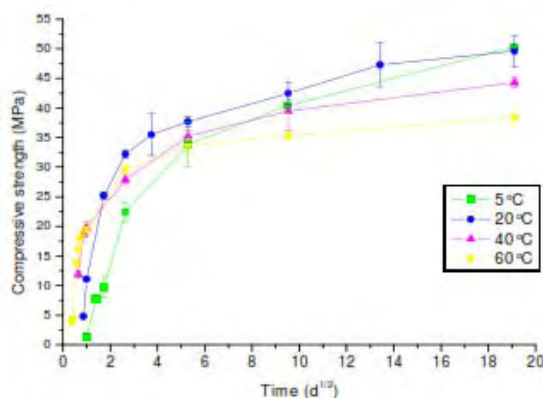
Les études sont nombreuses pour reporter l'effet de la température de mûrissement sur les résistances et d'autres propriétés des bétons vibrés et des BAP. C'est pourquoi, nous présentons d'abord cet effet sur les propriétés mécaniques instantanées, puis sur les propriétés mécaniques différées, enfin sur les indicateurs de la durabilité et la microstructure.

2.2.1 Propriétés mécaniques instantanées

2.2.1.1 Résistance mécanique à la compression

a) Béton vibré

Les résultats d'études plus anciennes [PRI51] et plus contemporaines [BUR96], [MOU97], [ATR03], [KAN03], [GAL06] s'accordent pour montrer que lorsque les éprouvettes de bétons sans additions minérales sont conservées à une température de mûrissement élevée aux très jeunes âges, les résistances sont plus élevées à court terme et plus faibles à long terme par rapport à celles obtenues à partir de la conservation à la température ambiante du laboratoire (figure 1.10 par exemple). Les réductions des résistances à long terme sont quantifiées entre 10% et 30% en fonction des compositions étudiées et de la température de conservation. Une modification de la microstructure des bétons peut être à l'origine des désordres enregistrés de la résistance (cf. § 2.2.3).



Eprouvettes de béton (OPC, E/C non donné) stockées tout au long de leur maturation dans des conditions isothermes à 5, 20, 40 et 60°C / 100% HR.

Plus la température est élevée, plus le développement de la résistance à jeune âge est rapide. Après trois jours d'hydratation, la résistance du béton à 20°C rattrape celle des bétons à 40 et 60°C. Après 28 jours, elle les dépasse, alors que le développement du béton à 60°C semble s'arrêter. Après un an, la résistance à 5°C rattrape celle à 20°C. La résistance à 60°C est de 25% inférieure

Figure 1.10 : développement de résistance de béton vibré en fonction de la température [GAL06]

Kanstad et al. [KAN03] rapportent que l'incorporation d'addition minérale telle que la fumée de silice ou la cendre volante permet de maintenir la résistance lorsque la température de mûrissement augmente de 20°C à 55°C dans des bétons de haute performance (70 à 80 MPa). Les auteurs ne donnent pas d'explication à cette observation. Sur des niveaux de résistance plus faibles, Kim et al. [KIM02] montrent également que l'emploi d'un liant ternaire (ciment type V ASTM (ajout non précisé) + cendre volante) maintien ou améliore les résistances à 28 jours entre 23°C et 50°C (maintien des conditions de cure jusqu'à 28 jours).

b) Béton autoplaçant

Les résultats relevés apparaissent dépendre de la nature du ciment utilisé et du niveau de résistance. Dans le même contexte expérimental que celui explicité en 2.1.1b), [WEI10] montrent que, lorsque les éprouvettes de BAP incorporant un ciment au laitier sont conservées à une température de

mûrissement élevée aux très jeunes âges (30°C durant 16 heures puis conservation dans l'eau à 20°C), les résistances sont plus élevées à court terme et équivalentes, dès 7 jours, à la référence mûrie à 20°C (figure 1.11). L'emploi d'un ciment au laitier peut donc être d'intérêt pour contrecarrer les effets préjudiciables d'une température de cure élevée.

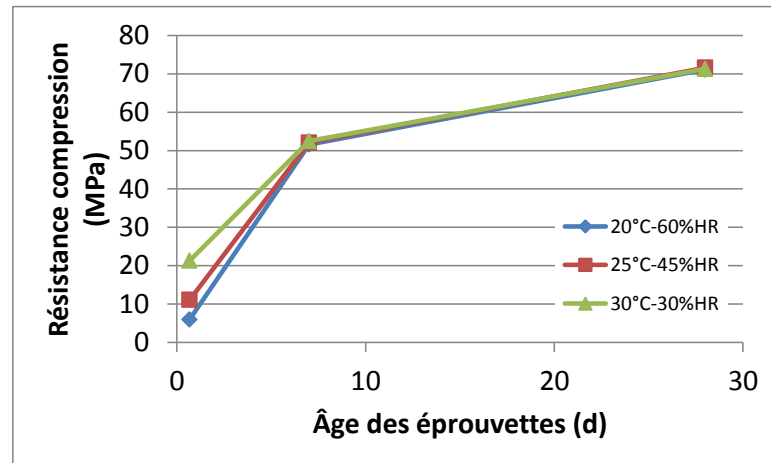


Figure 1.11 : évolution des résistances à 16h, 7j et 28j avec l'élévation de la température de cure d'un BAP incorporant un ciment CEM III/A [WEI10]

Dans un contexte de préfabrication qui demeure d'intérêt dans l'étude de l'effet de la température de mûrissement sur les résistances, [STE05], [REI06] comparent les résistances d'un ensemble de bétons mûris à différents cycles de température de telle façon que leur maturité soit équivalente à celle d'une conservation de 3 jours à 20°C. Les bétons incorporent un ciment CEM II/A LL, du filler calcaire en quantité supplémentaire et éventuellement des cendres volantes, un superplastifiant à base d'éther polycarboxylique. Ces constituants sont déclinés selon plusieurs proportions afin de viser des résistances comprises entre 25MPa et 55 MPa à la maturité de 3 jours à 20°C (rapport G/S toujours fixé à 1,16). Les résultats dépendent de la résistance visée mais mettent en évidence une altération dès lors que la température maximale du cycle est de 40°C (figure 1.12). Pour les résistances visées supérieures à 45MPa, l'utilisation d'un agent de viscosité n'entraîne pas de baisses de résistances entre 20°C et 60°C. L'augmentation des résistances toujours observée (agent de viscosité ou non) au-delà de 60°C n'est pas expliquée par les auteurs qui précisent seulement que la température élevée augmente les micropores n'influençant pas la résistance.

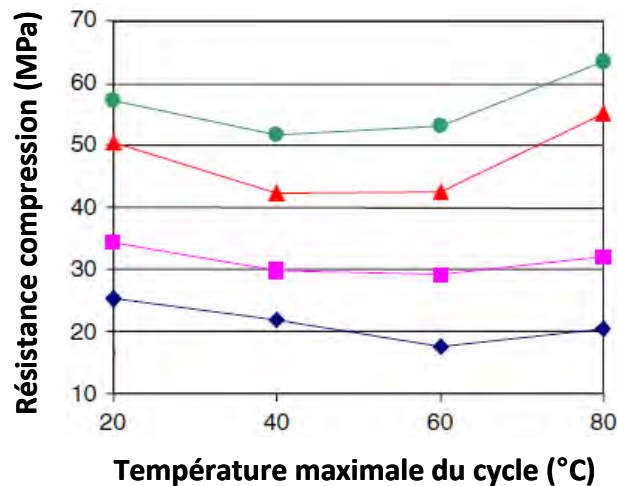


Figure 1.12 : résistance à la compression en fonction de la température maximale du cycle subi par des BAP de résistance visée entre 25MPa et 55MPa [STE05], [REI06]

Aggoun et al. [AGG08] confirment ce défaut de résistance dans les premiers jours et montrent que ce défaut demeure à 28 jours pour des bétons dont les résistances varient de 30MPa à 70MPa à 28 jours. Les 3 bétons incorporent du filler calcaire, un ciment CEM II/32,5R (30MPa) ou un ciment CEM I 52,5R (50MPa et 70 MPa) ; le même superplastifiant est utilisé dans les 3 cas (nature non précisée), le rapport G/S est égal à 0,8.

2.2.1.2 Module d'élasticité (en compression)

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton. Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et d'un ratio G/S plus faible qu'un béton vibré [FAR09]. Les résultats sont discordants dans la comparaison BAP/BV à température ambiante. [PER01], [PON03] ont en effet montré que le module est similaire pour les BAP et les BV ; d'autres auteurs indiquent que les modules de BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [ASS04], [SCH04], [LUI07], qu'en est-il pour chaque type de béton avec l'élévation de la température de mûrissement ?

a) Béton vibré

Mouret [MOU97] met en évidence que le module sécant à la compression, à 30% de la charge de rupture n'est pas modifié par l'augmentation de la température de cure de 20°C à 35°C durant les premières heures de l'hydratation, pour une classe de résistance donnée. D'autres auteurs montrent également les mêmes tendances, que les bétons incorporent ou non des additions minérales, d'autres variétés de ciment qu'un OPC et qu'ils soient soumis à des températures encore plus élevées (50°C-55°C) durant des temps plus longs [KIM02], [KAN03].

b) Béton autoplaçant

A notre connaissance, aucune étude ne présente l'évolution du module en fonction de la température du mûrissement.

Aggoun et al. [AGG08] rapportent que la variation de la composition du BAP, l'étuvage et son mode d'application n'ont pas d'effets importants sur la tendance générale de la relation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité.

Chopin et al. [CHO03] ont montré que lorsque les éprouvettes sont conservées à une température de mûrissement élevée aux très jeunes âges, les déformations instantanées des BAP étudiés n'étaient pas plus élevées que celles du BV.

2.2.1.3 Bilan

S'agissant de la résistance à la compression, les résultats dépendent beaucoup des paramètres de formulation et de la durée d'application de la température de cure. Les désordres de résistance à 28 jours des bétons traditionnels vibrés sont observés lorsque la température de mûrissement des éprouvettes augmente ; ce désordre semble néanmoins atténué lorsque le béton incorpore des additions minérales et/ou un ciment aux ajouts. La tendance semble demeurer dans le cas des BAP, même si l'emploi de ciment au laitier apparaît annihiler les désordres de résistance. Ces désordres ne sont pas visibles sur les modules des bétons vibrés. La même tendance pourrait exister pour les BAP, même si nous n'avons pas trouvé d'étude explicite.

2.2.2 Propriétés mécaniques différées

Nous n'avons pas trouvé d'études traitant exclusivement du retrait et du fluage des BAP soumis à des températures de cure élevées, mais plutôt des études qui comparent les comportements différés des bétons traditionnels vibrés (BV) et des BAP à température ambiante et à température élevée (contexte d'étuvage en préfabrication). Nous présentons alors maintenant les résultats comparatifs pour le retrait d'une part, le fluage d'autre part.

2.2.2.1 Retrait

On distingue la déformation de retrait endogène et de dessiccation. La première représente le comportement dans le béton en empêchant tout échange hydrique avec l'extérieur. La deuxième considère le gradient hydrique entre l'intérieur de l'éprouvette et l'ambiance dans laquelle elle est stockée. Le retrait de dessiccation n'est pas une mesure directe, il représente la différence entre le retrait total et le retrait endogène.

La comparaison entre BV et BAP à température ambiante conduit à des résultats controversés.

En ce qui concerne le retrait endogène, certains auteurs [HU98] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (figure 1.13a), d'autres [PON03] (figure 1.14) contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton [ASS04].

En ce qui concerne le retrait de dessiccation, l'auteur [HU98] trouve des déformations sur les BAP plus importantes que celles mesurées sur des BV (figure 1.13b), d'autant plus importantes que le rapport G/S est faible. Mais, d'autres auteurs [SON99] observent des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés, à quantité de ciment et rapport E/C équivalents mais à volume de pâte différent (figure 1.15). Le phénomène est attribué au volume de pâte et au rapport E/L car, d'après [NEV00], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

D'Ambrosia et al. [AMB05] montrent que les déformations de retrait (endogène et total) augmentent avec le volume de pâte et un faible rapport E/C dans les BAP (figure 1.16).

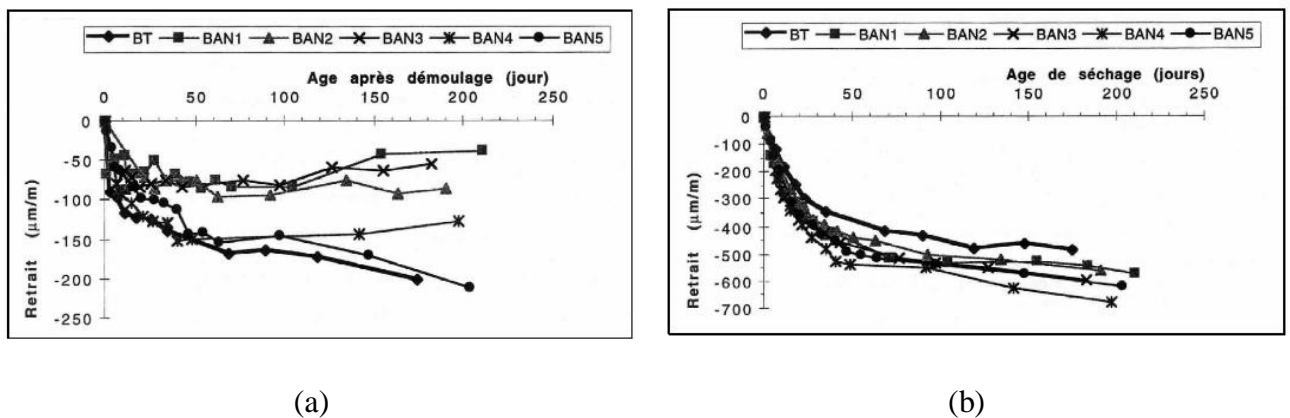


Figure 1.13 : comparaison des retraits endogènes (a) et de dessiccation (b) d'un béton vibré et de cinq BAPs [HU98]

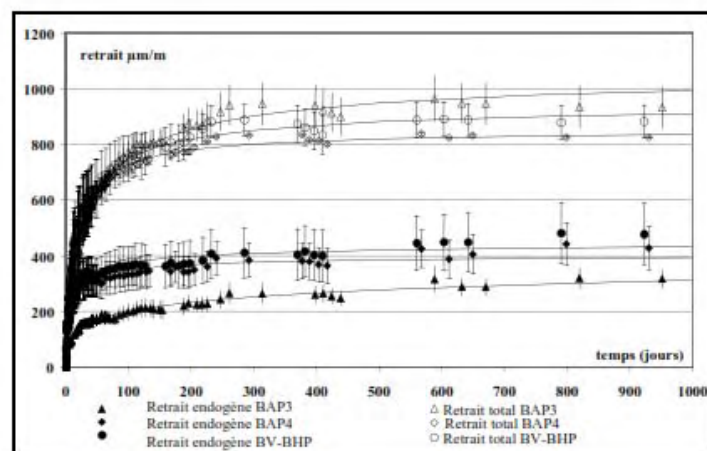


Figure 1.14 : retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60 MPa [PON03]

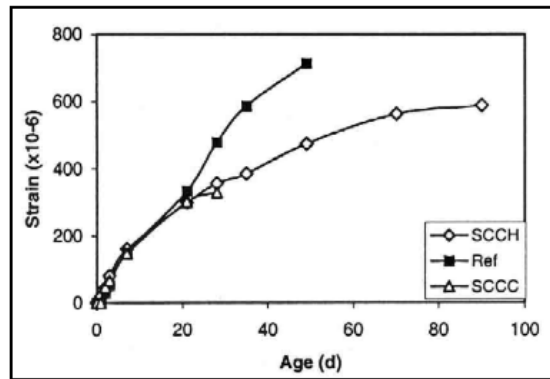


Figure 1.15 : retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré [SON99]

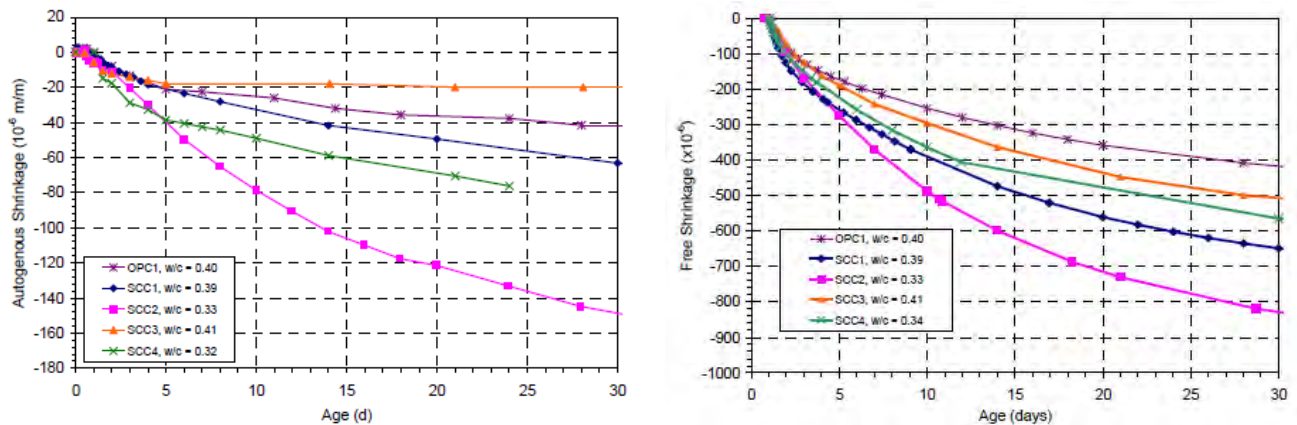


Figure 1.16 : retrait endogène (gauche) et retrait total (droite) des BAP (SCC) et BV (OPC) [AMB05]

Choppin et al. [CHO03] ont lancé un programme expérimental dans lequel cinq bétons autoplacants (OPC+filler calcaire+superplastifiant (PMS ou PCP), volume de pâte variant de 32% à 39% du volume de béton, G/S variant de 1 à 1,2) et un béton vibré (OPC+superplastifiant (PCP) à faible dosage par comparaison aux BAP, volume de pâte de 25%, G/S=1,3) ont été mis en œuvre. Tous les bétons ont été curés pendant 18 heures selon une histoire de température utilisée en préfabrication avec un palier maximum à 60°C. Les résultats ont montré que les déformations (endogène et totale) des BAP ne sont pas significativement plus élevées que celles mesurées sur le BV (figure 1.17 par exemple). Les auteurs concluent que ni l'absence de vibration, ni la nature du superplastifiant utilisée ne semblent avoir une influence sur les retraits du béton autoplacant.

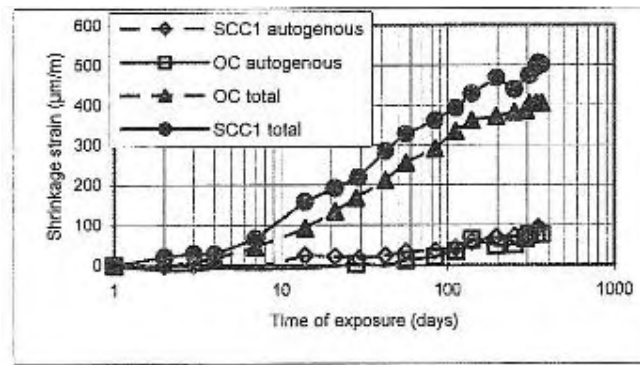


Figure 1.17 : comparaison des déformations de retrait entre BV et BAP [CHO03]

2.2.2.2 Fluage

Le fluage est le comportement différé du béton soumis à un chargement stationnaire. La réponse du béton au chargement se compose d'abord d'une déformation élastique instantanée qui dépend, entre autre, de la maturité du béton et de l'intensité de la charge, puis d'une déformation supplémentaire apparentée à une déformation viscoplastique. Cette dernière se caractérise par une cinétique d'évolution décroissante. Rien ne permet d'affirmer qu'elle s'arrête à un moment donné, les essais n'étant pas menés à très long terme [PRO02].

Les déformations de fluage ne sont pas des grandeurs directement mesurables et nécessitent la connaissance des déformations sous charge et de retrait pour être déterminées (figure 1.18). Le lecteur trouvera dans les articles de [ULM98, 99], [ACK03], [NEV00], [PRO02] de plus amples informations sur les origines, les théories explicatives et les phénomènes associés au retrait et au fluage.

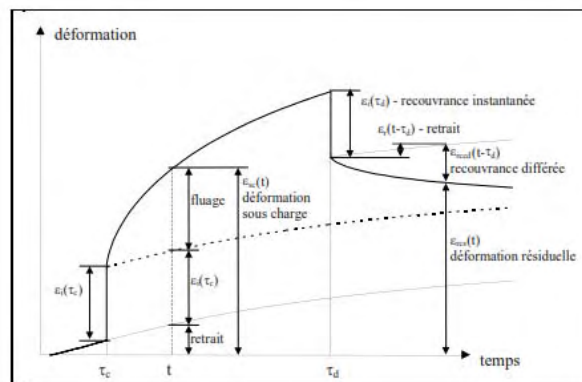


Figure 1.18 : décomposition conventionnelle des déformations différées [PRO02]

La comparaison entre BV et BAP à température ambiante conduit à des résultats qui semblent montrer que les déformations différées sous charge des BAP sont supérieures à celles des BV. Assié [ASS04] observe ce fait dans le cas des bétons d'ouvrage (40MPa) et de hautes performances (60MPa), exception faite des bétons de bâtiment (20MPa), et le relie au plus grand volume de pâte

dans les BAP en raison d'une quantité de fines supplémentaires (filler calcaire dans le contexte expérimental).

Dans le même contexte que celui explicité au § 2.2.2.1 sur le retrait, Chopin et al. [CHO03] ont montré que lorsque les éprouvettes sont conservées à une température de mûrissement élevée aux très jeunes âges, les fluages spécifiques du BAP (total et endogène) peuvent être plus élevés que ceux du BV (figure 1.19). Les auteurs restent très réservés au sujet de l'influence du volume de pâte sur le fluage car ils montrent également que deux BAP au volume de pâte très différent (résistance à la compression néanmoins équivalente aux échéances de mesure) présentent les mêmes fluages spécifiques (endogène et total).

2.2.2.3 Bilan

Les résultats apparaissent controversés concernant la comparaison du retrait entre BAP et béton vibré (BV) à température ambiante. A notre connaissance, une seule étude montre que les retraits (endogène, total) des BAP et des BV à température de mûrissement élevée ne sont pas différents. A l'inverse, les fluages (endogène et total) tendent à être plus élevés dans les BAP, à température de mûrissement ambiante ou élevée, même si la question reste ouverte au sujet de l'incidence du volume de pâte comme premier facteur de ces différences. A notre connaissance également, il n'y a pas de résultats qui permettent la comparaison exclusive des propriétés différées de formulations BAP mûries à température ambiante et élevée.

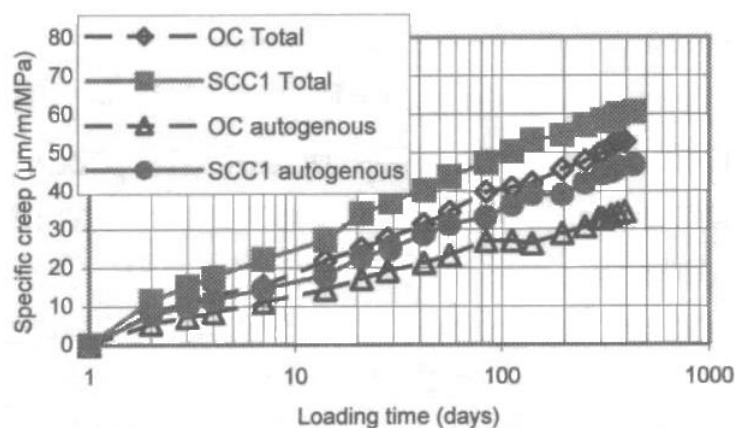


Figure 1.19 : comparaison entre les fluages spécifiques du BV et du BAP [CHO03]

2.2.3 Propriétés de transport et durabilité

On rapporte dans ce paragraphe les effets d'une température élevée aux jeunes âges sur le réseau poreux des BAP. En particulier, on s'intéressera aux composantes majeures du réseau poreux :

- la porosité qui traduit le volume poreux du matériau,
- l'absorption d'eau par capillarité qui donne une image de la taille des pores capillaire ;

- la perméabilité aux gaz qui peut être reliée à la connectivité et la tortuosité des pores ;
- la diffusion des ions chlorure (migration) qui informe sur la diffusivité d'une espèce au travers de la matrice du matériau.

2.2.3.1 Porosité

a) Béton vibré

Les résultats ne sont pas unanimes, vraisemblablement en raison des variétés de compositions et de nature des constituants. La durée d'application de la température de mûrissement est également un facteur d'importance.

Mouret et al. [MOU05] ont montré que la conservation des éprouvettes de contrôle à 35°C durant 5 heures n'induit pas une augmentation de la porosité accessible à l'eau à 28 jours, pour une température initiale donnée, un moyen donné de maintenir la consistance lorsque la température initiale durant le malaxage était à 50°C, quelles que soient la classe de résistance étudiée (22MPa, 35MPa) et la nature granulaire (siliceux ou calcaire poreux), (figure 1.20 par exemple).

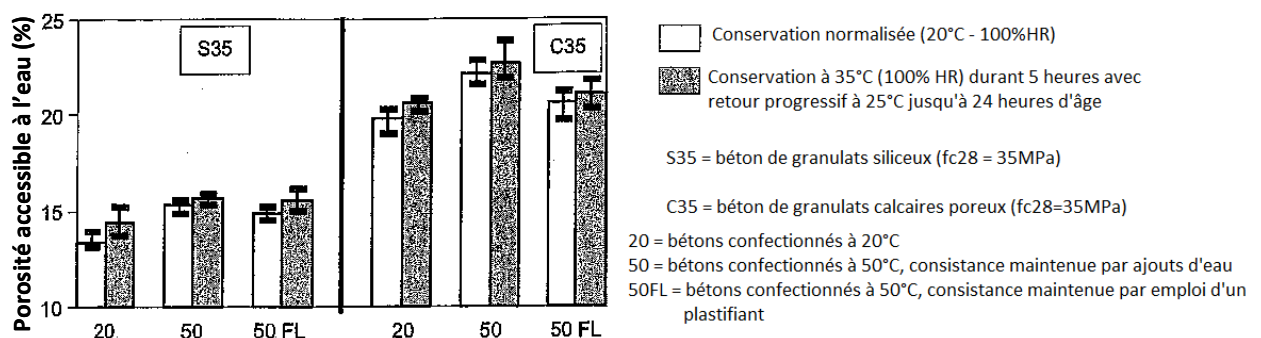


Figure 1.20 : porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction de la température de mûrissement [MOU05]

Gallucci et al. [GAL06] ont quantifié, par analyse d'images obtenues en microscopie électronique à balayage à partir de sections polies de béton, la porosité capillaire en fonction de la température de mûrissement maintenue jusqu'aux essais. La porosité présente une évolution typique dans le temps, en fonction de la température de mûrissement (figure 1.21). On distingue deux périodes : à très jeune âge, plus la température est basse, plus la porosité est élevée, ce qui s'explique par une cinétique lente de l'hydratation. Très rapidement, on observe une inversion des tendances avec des porosités d'autant plus fortes que la température augmente. Le fait que ces auteurs ne trouvent pas de relation directe entre le taux d'hydratation et la porosité confirme que la température agit sur la répartition des hydrates plutôt que sur leur quantité (cf. § 2.2.4).

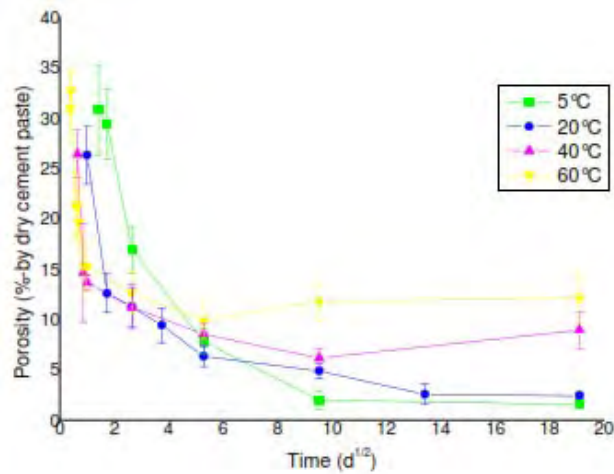


Figure 1.21 : évolution de la porosité (mesurée par analyse d'image) [GAL06]

b) Béton autoplaçant

Selon le contexte expérimental explicité au § 2.2.1.1b), Reinhardt et Stegmaier [REI06] ont étudié l'influence de la température sur la porosité (mesurée par intrusion au mercure) de BAP à maturité équivalente à 3 jours de cure isotherme à 20°C. Ils ont constaté que l'élévation de la température ne modifie pas significativement la porosité totale (figure 1.22) mais qu'elle agit sur la répartition des pores en augmentant la quantité des petites tailles de pores capillaires (au voisinage de 0,1µm).

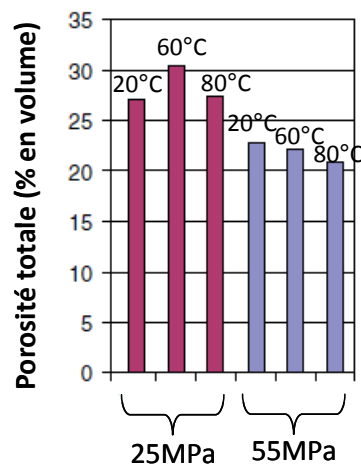


Figure 1.22 : porosité totale de BAPs conservés à 20°C, 60°C et 80°C [REI06]

Malgré des compositions différentes (présence d'additions minérales telles que le filler calcaire et la cendre volante notamment dans les BAP de [REI06]), les résultats ci-dessus sont consistants avec ceux relevés sur bétons vibrés par [GAL06] (figure 1.21) au moins dans les évolutions et pour les gammes de résistances élevées : l'hydratation accélérée par la température diminue la porosité dans les premiers âges du béton.

2.2.3.2 Absorption d'eau

a) Béton vibré

Selon Mouret et al. [MOU05], la température de mûrissement élevée aux jeunes âges ne modifie pas l'absorption initiale (première heure d'absorption) des bétons à l'âge de 28 jours, mais une augmentation de leur absorptivité évaluée entre 1 heure et 24 heures d'absorption (figure 1.23) ; ils concluent alors que les baisses de résistance enregistrées avec la température plus élevée est liée à une augmentation de la proportion des pores capillaires les plus fins.

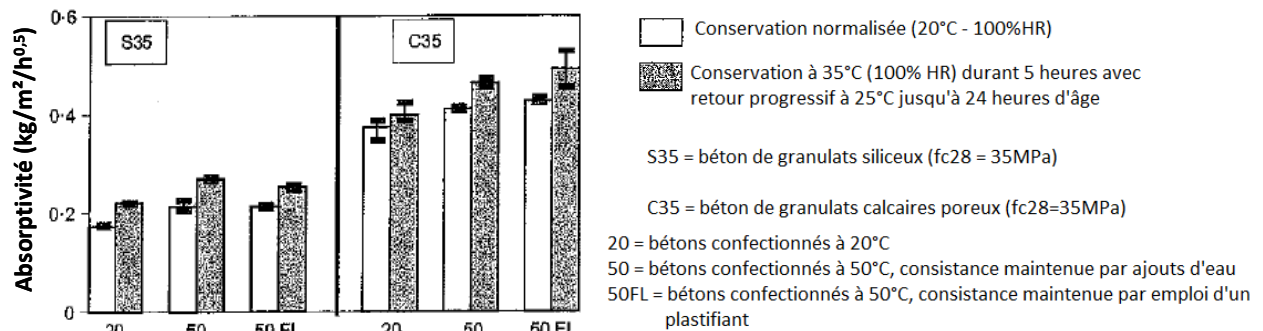


Figure 1.23 : absorptivité de bétons vibrés à 28 jours, mûris à des températures de 20°C ou 35°C durant les premières heures [MOU05]

b) Béton autoplaçant

Nous n'avons pas trouvé d'études présentant des résultats d'absorption sur des BAP mûris à température élevée aux très jeunes âges, mais des études [ASS04], [BOE05] qui comparent BAP aux fillers calcaires et BV à température ambiante et qui montrent que l'absorption n'est pas très différente entre les deux groupes de béton lorsque le rapport E/C est comparable. L'absorption par immersion et la sorptivité sont en effet plus élevées (plus faibles) dans le cas où le BAP présente un rapport E/C plus élevé (plus faible) que le BV de comparaison [BOE05] (tableau 1.1).

Tableau 1.1 : absorption d'eau par immersion (28j) et par capillarité (28j) de trois BAP et d'un béton vibré [BOE05]

Mélange	Absorption par immersion (%)	Sorptivité (g/h)				
			SCC1	SCC2	SCC3	TC1
SCC1	4,8	1,30	CEM I 42,5 R [kg/m³]	360	360	360
			limestone filler [kg/m³]	240	240	240
			water [kg/m³]	165	144	198
SCC2	4,2	1,18	river sand 0/5 [kg/m³]	853	853	853
			river gravel 4/14 [kg/m³]	698	698	698
			superplasticizer [l/m³]	2.3	3.6	1.8
SCC3	6,3	1,51	W/C [-]	0.46	0.40	0.55
TC1	4,9	1,32				0.46

2.2.3.3 Perméabilité aux gaz

a) Béton vibré

Mouret et al. [MOU05] n'observent pas de variation de la perméabilité à l'air à 28 jours d'âge avec l'élévation de la température de cure, les autres paramètres étudiés étant fixés (température initiale du béton, classe de résistance du béton et nature granulaire).

b) Béton autoplaçant

Pour cette propriété encore, nous n'avons trouvé seulement que des études comparant la perméabilité aux gaz du BAP et du BV à température ambiante. La tendance qui apparaît est une perméabilité à l'oxygène intrinsèque plus importante pour les BAP (filler calcaire comme addition minérale) à même niveau de résistance [ASS05] (figure 1.24). En revanche, Boel et al. [BOE08] montrent une diminution de la perméabilité dans les BAP (filler calcaire), à rapport E/C constant, quelle que soit la nature du ciment utilisé (après 3 mois de cure humide).

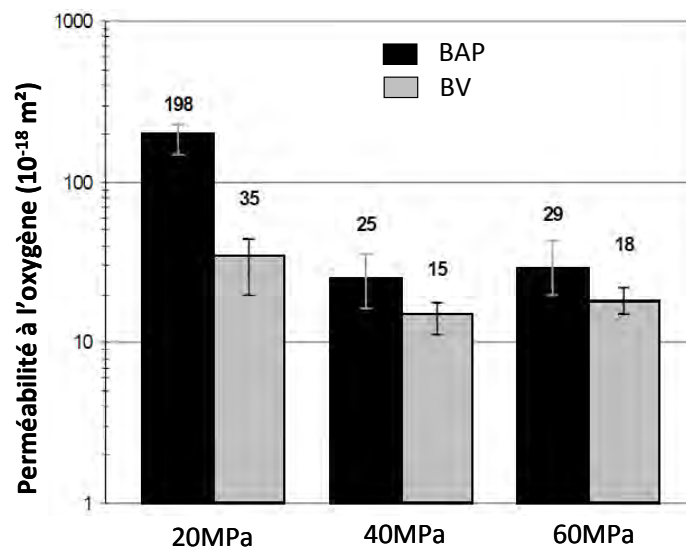


Figure 1.24 : perméabilité intrinsèque après 28 jours de cure humide (échantillons séchés) [ASS05].

2.2.3.4 Diffusion des ions chlore

Peu d'études traitent de l'évolution de la résistance à la diffusion des ions chlore dans les BAP ayant subi des températures élevées de cure. La comparaison BAP/BV à température ambiante montre que les coefficients effectifs sont similaires [ZHU01], [ASS05].

Zhao et al. [ZHA12] observent que le coefficient de diffusion d'un BAP (OPC + cendre volante + superplastifiant de type polycarboxylate) après 28 jours d'âge n'est pas modifié même si les bétons sont soumis depuis leur confection à des températures de 28-32°C (75-85%HR) (figure 1.25).

El-Chabib et al. [CHA13] ont mesuré la pénétration des ions chlorure par conductivité électrique

sur des bétons très fluides (étalement supérieur ou égal à 580mm) à l'échéance de 56 jours. Les bétons contenaient des substitutions variables au ciment de combinaisons diverses entre laitier, cendre volante (calciue ou siliceuse) et fumée de silice (utilisation d'un superplastifiant polycarboxylate, E/C fixés à 0,30 et à 0,33 pour deux séries de bétons). Tous les bétons ont été soumis à une cure humide de 7 jours (température du laboratoire non précisée et HR≥95%) puis, jusqu'à l'essai, laissés soit à l'air libre à la température du laboratoire, soit placés dans une étuve à 46°C, le jour, et dans le laboratoire à la température ambiante, la nuit. Les auteurs montrent que la cure à température élevée entraîne des susceptibilités plus faibles à la migration. Cette observation est vraie quelle que soit la composition étudiée.

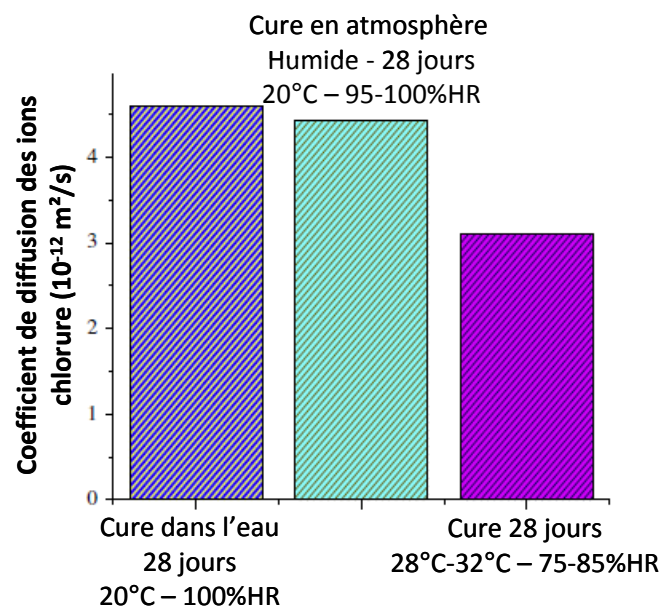


Figure 1.25 : coefficient de diffusion des ions *chlore* d'un BAP après 28 jours, selon 3 modes de cure [ZHA12].

2.2.3.5 Bilan

S'agissant de la porosité, les résultats dépendent des compositions et de la durée d'application de la température de mûrissement. Il est possible d'observer des porosités aux jeunes âges qui sont plus faibles lorsque la température de cure est élevée, aussi bien sur les bétons vibrés que sur les BAP. A plus long terme, les résultats sont seulement disponibles sur les bétons vibrés, et la porosité peut ne pas être affectée voire être plus faible qu'un mûrissement à 20°C.

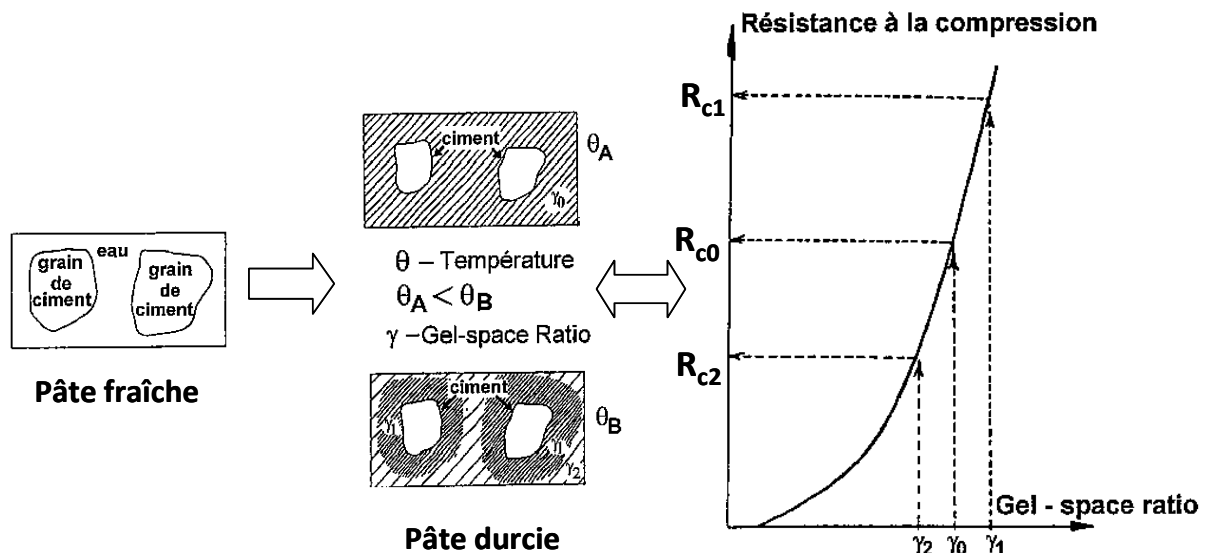
Concernant l'absorption d'eau et la perméabilité aux gaz, nous n'avons pas trouvé d'études mentionnant le comportement des BAP soumis à des températures élevées aux jeunes âges. La comparaison BAP/BV à température ambiante ne montre pas de différence significative. Pour les BV soumis à des températures élevées, l'absorptivité peut augmenter, ce qui traduit une augmentation de la proportion des capillaires les plus fins, alors que la perméabilité n'est pas

affectée. Enfin, la diffusion des ions chlorure dans les BAP ne semble pas affectée par des températures élevées, elle peut même être diminuée par comparaison à un mûrissement à température ambiante.

2.2.4 Microstructure

a) Béton vibré

C'est la théorie de Verbeck et Helmuth [VER68] qui prédomine pour expliquer à long terme les baisses de résistance et l'augmentation de la porosité dans les matériaux cimentaires mûris à des températures élevées (jusqu'à 110°C). Cette théorie a été confirmée par des travaux plus récents grâce à l'analyse d'images sur sections polies de pâtes de ciment observées en microscopie électronique à balayage [KJE90], [KJE91], [SCR92]. C'est l'accélération de l'hydratation qui provoque rapidement la formation d'une couche dense d'hydrates autour des anhydres en raison de la faible diffusivité des espèces dissoutes et de la faible solubilité des hydrates formés. La faible porosité de cette couche ralentit le processus de diffusion et entraîne une répartition hétérogène des hydrates entre les anhydres. Il s'ensuit à long terme un rapport volume de pâte hydratée / volume apparent de pâte (volume de pâte hydratée + porosité capillaire) ou gel/space ratio plus faible et une plus faible résistance alors qu'aucune différence physico-chimique (quantité, composition, surface spécifique et taille) n'existe dans la nature des hydrates formés, selon [VER68]. La figure 1.26 illustre la théorie de Verbeck et Helmuth.



A mêmes E/C et degré d'hydratation, $\gamma_1 > \gamma_0 > \gamma_2$. La distribution homogène des hydrates à la température θ_A entraîne la résistance R_{c0} ; La distribution hétérogène des hydrates à θ_B entraîne la résistance R_{c2} imposée par la distribution d'hydrates au plus faible rapport γ_2 .

Figure 1.26 : distribution hétérogène des hydrates avec l'élévation de la température de cure et conséquence sur la résistance, d'après [KJE87]

b) Béton autoplaçant

A notre connaissance, aucune étude ne rapporte la microstructure des matrices de BAP soumis à des températures comparables à celles qui prévalent par temps chaud.

c) Bilan

Alors que la théorie de Verbeck et Helmuth [VER68] est largement admise pour expliquer le comportement des bétons vibrés par temps chaud, aucune étude ne vient la confronter dans le cas des BAP. Ces derniers incorporent des additions minérales qui leur confèrent une microstructure plus dense à température ambiante, [TRA99] par exemple. Dans le cas d'additions inertes telles que les fillers calcaires largement utilisés en France dans les formulations de BAP, l'effet de germination hétérogène [LAW03] peut avoir un effet positif sur la structuration de la matrice. Quid de ces considérations en conditions de température élevée en ajoutant l'interaction avec un adjuvant chimique de type superplastifiant ?

3. CONCLUSION

L'objectif de cette revue bibliographique était de donner un état d'avancement des travaux et des connaissances acquises sur le comportement des bétons autoplaçants (BAP) par temps chaud, par comparaison aux connaissances très fournies en la matière en ce qui concerne les bétons traditionnels vibrés (BV).

Les résultats rapportés sont homogènes dans le cas des BV et il est possible d'affirmer que les températures élevées lors de la fabrication et de la maturation conduisent généralement à, de manière séparée ou conjointe :

- une évaporation en phase de malaxage et une accélération de la cinétique d'hydratation du ciment qui conduisent à une perte rapide de maniabilité à l'état frais ;
- des augmentations de résistance mécanique à la compression aux très jeunes âges et des baisses à plus long terme associées à une altération de certains indicateurs de durabilité (absorption d'eau);
- des baisses accentuées de résistance à long terme si l'ouvrabilité est maintenue par des ajouts d'eau qui entraînent une diminution de la compacité du béton frais ;
- des résistances à long terme équivalentes, voire plus élevées que celles obtenues à des conditions de fabrication et de mûrissement à 20°C lorsque l'ouvrabilité est maintenue par l'emploi d'un plastifiant.

Dans le cas des BAP, les résultats disponibles sont plus discordants. Ainsi, par comparaison aux BV, on peut ne pas observer une altération aussi marquée de l'ouvrabilité dans les premiers temps

qui suivent le malaxage à température élevée ; on peut ne pas constater de baisses de résistances à long terme lorsque la température de mûrissement des éprouvettes est élevée. Cette discordance s'explique par un plus grand nombre de constituants impliqués dans une formulation de BAP, comparativement à celle d'un BV et également à la variété de ces constituants. On pense notamment aux additions minérales et aux superplastifiants. A cette variété des constituants s'ajoute le contexte expérimental qui ne conduit jamais réellement à considérer le contexte d'un bétonnage par temps chaud dans sa globalité. Les études rapportées se restreignent essentiellement à évaluer les propriétés du béton lorsqu'il est mûri dès les premières heures à des températures élevées, ce qui ne renvoie pas totalement au contexte du temps chaud. Même en se limitant au paramètre de température du temps chaud, il est important d'intégrer ensemble la phase de malaxage et celle du mûrissement des éprouvettes afin d'apprécier plus réellement l'effet du temps chaud sur les propriétés du BAP.

C'est pourquoi ce travail s'inscrit dans une suite logique de la thèse de Mouret [MOU97], dans le contexte des éprouvettes de contrôle. Ce type d'éprouvettes permet d'accepter ou non la qualité du béton de l'ouvrage réalisé. Mouret a montré qu'il n'y a pas d'autres raisons d'expliquer les chutes de résistances observées sur les éprouvettes de contrôle en période de temps chaud que celles liées à des ajouts d'eau lorsque la température au malaxage augmente, et à une conservation à température élevée des éprouvettes. Ces pratiques renvoient à un non-respect des règles de l'art vis-à-vis d'un bétonnage en général.

Le présent travail va donc consister à établir des compositions de BAP en choisissant les constituants de base en fonction des résultats relevés dans la littérature, à tester ces compositions en conditions de temps chaud : malaxage à température élevée, incidence de la température sur le maintien de l'autoplaçance, conservation des éprouvettes à température élevée. Il sera alors possible :

- d'apprécier les évolutions des propriétés du BAP par temps chaud dans un contexte expérimental identique à celui utilisé pour caractériser les mêmes propriétés sur BV [MOU97] ;
- d'apporter des éléments d'explication aux éventuelles différences de comportement que l'on peut soupçonner compte tenu des éléments relevés en ce sens dans la littérature.

Dans le cadre de ces objectifs, on présente d'abord les matériaux et méthodes utilisés (chapitre 2), puis on présente les résultats de premier niveau concernant l'état frais (chapitre 3), les résistances mécaniques en compression obtenues suite aux actions menées à l'état frais (chapitre 4). Une analyse des variations de résistance est ensuite réalisée en la couplant à des investigations physico-chimiques (chapitre 5). Le dernier chapitre (chapitre 6) vient vérifier si les résultats acquis sur les

résistances sont suffisantes ou non pour décrire le comportement d'un BAP par temps chaud ; pour ce faire, des résultats obtenus sur des indicateurs de durabilité et sur le comportement différé viendront compléter l'analyse.

CHAPITRE 2

Matériaux et méthodes

1.	LES CONSTITUANTS DE BASE	38
1.1.	CIMENTS	38
1.2.	FILLER CALCAIRE	39
1.3.	SUPERPLASTIFIANT	40
1.4.	PHASE GRANULAIRE	41
2.	FORMULATIONS DES BETONS ET DES PÂTES	41
2.1.	FORMULATION DES BETONS	42
2.2.	FORMULATION DES PATES	45
3.	METHODE EXPERIMENTALE : DE LA PREPARATION DES CONSTITUANTS A LA CONSERVATION DES EPROUVETTES	45
3.1.	PREPARATION DES CONSTITUANTS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE INITIALE DU BETON	45
3.2.	MALAXAGE ET MAINTIEN DE L'AUTOPLAÇANCE A TEMPERATURE INITIALE ELEVEE	46
3.3.	ESSAIS A L'ETAT FRAIS	47
3.3.1.	<i>Etalement [NF EN 12350-8]</i>	47
3.3.2.	<i>Boîte en L [NF EN 12350-10]</i>	48
3.3.3.	<i>Stabilité au tamis [NF EN 12350-11]</i>	49
3.3.4.	<i>Masse volumique apparente [NF EN 12350-6] et teneur en air [NF EN 12350-7]</i>	50
3.3.5.	<i>Teneur en eau du béton</i>	50
3.3.6.	<i>Séquence d'essai</i>	51
3.4.	CONSERVATION DES EPROUVETTES	51
3.4.1.	<i>Conservation durant les premières 24 heures</i>	51
3.4.2.	<i>Conservation entre les premières 24 heures et l'échéance d'essai</i>	52
3.5.	DENOMINATION DES BETONS ET DES PATES	52
4.	CARACTERISATION A L'ETAT DURCI	53
4.1	ESSAIS MECANQUES	53
4.1.1	<i>Résistance mécanique à la compression</i>	53

4.1.2	<i>Module d'élasticité</i>	53
4.1.3	<i>Mesures des déformations de retrait.....</i>	54
4.1.4	<i>Mesures des déformations de fluage.....</i>	55
4.2	ESSAIS PHYSICO – CHIMIQUES ET DURABILITE.....	57
4.2.1	<i>Porosité accessible à l'eau.....</i>	57
4.2.2	<i>Absorption d'eau</i>	58
4.2.3	<i>Perméabilité aux gaz</i>	58
4.2.4	<i>Migration des ions chlorures</i>	60
4.2.5	<i>Analyses thermiques.....</i>	61

1. LES CONSTITUANTS DE BASE

1.1. Ciments

Deux natures de ciment ont été utilisées pour tenir compte de l'importance des interactions filler/ciment qui dépendent des propriétés de chaque poudre. Un ciment CEM I 52,5 N produit par la société LAFARGE à l'usine du Havre a été sélectionné, compte tenu de son utilisation régulière dans les applications BAP. Le ciment CEM III 52,5N du Havre a été considéré afin de se placer dans l'évolution des pratiques constructives actuelles (limitation de la quantité de clinker) et de limiter la variation des propriétés (classe, clinker). Les propriétés physico-chimiques des deux ciments conformes à [EN 197-1] sont regroupées dans les Tableaux 2.1 et 2.2. Les données présentées sont celles fournies par le fabricant, excepté la surface spécifique BET et les indicateurs granulométriques.

Tableau 2.1 : propriétés et compositions des ciments

Notation	CEM I	CEM III
Classe	52,5	52,5
Réactivité	N	N
Origine	Le Havre	Le Havre
Masse volumique (g/cm³)	3,11	3,01
Surface Blaine (cm²/g)	3750	3760
Spécifique BET (cm²/g)	11700	12900
% massique de clinker	98,5	59,4
% massique d'addition	0	40(S)
Composition de Bogue du clinker (% massique)		
C₃S	66,4	66,4
C₂S	5,6	5,6
C₃A	11,4	11,4
C₄AF	5,4	5,4
Gypse (% massique)	6	5
%<5μm	18,5	21,5
D₅₀ (μm)	15,9	12,6
C_U	7,1	6,3
C_C	0,9	1,3

Tableau 2.2 : compositions chimiques des ciments (% massique)

	CEM I	CEM III
SiO ₂	20,43	21,80
Al ₂ O ₃	4,90	5,15
Fe ₂ O ₃	1,83	2,35
CaO	65,40	61,30
MgO	1,06	2,25
K ₂ O	0,27	0,80
Na ₂ O	0,19	0,15
SO ₃	3,60	2,30
Perte au feu	1,44	0,60

1.2. Filler calcaire

Le filler calcaire est l'addition calcaire la plus utilisée en France pour la confection des bétons autoplaçants, compte tenu de sa disponibilité et de son faible coût. C'est pourquoi un filler calcaire a été utilisé dans cette étude. L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement à partir d'une roche calcaire, s'insère dans le squelette granulaire du ciment (Figure 2.1) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

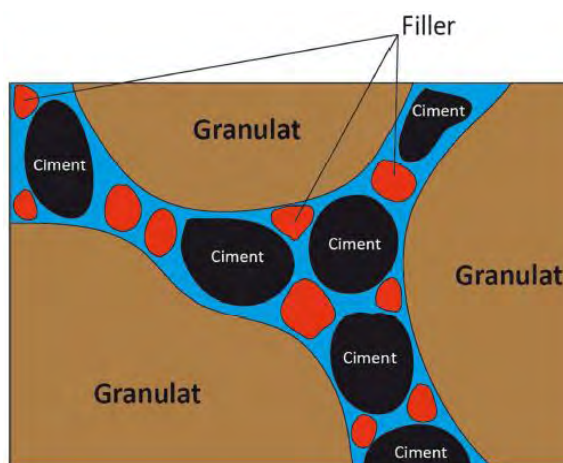


Figure 2.1: illustration de l'effet filler [DIE10]

Le filler calcaire employé est issu d'un site de production de la société Carmeuse France ; il est conforme à la norme sur les additions minérales calcaires [NF P18-508]. Ses propriétés physiques et chimiques sont données dans les Tableaux 2.3 et 2.4.

Tableau 2.3 : propriétés du filler calcaire

Masse volumique (g/cm³)	2,72
Surface Blaine (cm²/g)	6500
Spécifique BET (cm²/g)	26400
%<5µm	48,5
D₅₀ (µm) (sédigraphie)	5,5
D₉₀ (µm) (sédigraphie)	43,4
C_U	9,5
C_C	0,5

Tableau 2.4 : composition chimique du filler calcaire (% massique)

SiO₂	0,7
Al₂O₃	0,2
Fe₂O₃	0,4
CaO	54,7
MgO	0,4
K₂O	0,04
Na₂O	0,02
SO₃	0,02
Mn₃O₄	0,01
Perte au feu	42,9

1.3. Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est issu de la famille des polycarboxylates. Il est produit par la société CHRYSO (OPTIMA 220) et est particulièrement adapté aux applications autoplaçantes. Il se présente sous la forme d'un liquide brun avec une plage de dosage comprise entre 0,3% et 2% en masse de poudre. Les principales propriétés du produit (données fabricant) sont résumées dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 : propriétés du superplastifiant

Dénomination	Optima 220
Molécule principale	polycarboxylate
Densité (20°C) (g/cm³)	1,05
pH	5,0
Teneur en ion Cl⁻ (%)	≤0,1
Na₂O équivalent (%)	<1
Extrait sec (%)	21,6
Plage de dosage préconise (% massique de poudre)	0,3 a 2

1.4. Phase granulaire

Le sable (0/4mm) et le gravier (4/10mm) utilisés sont naturels, siliceux et roulés ; ils sont issus du bassin de la Garonne et couramment employés dans les applications autoplaçantes. Leurs principales propriétés sont récapitulées dans le tableau 2.6 et leurs granularités sont présentées sur la figure 2.2.

Tableau 2.6 : principales propriétés du sable et du gravillon utilisés

	Sable 0/4mm	Gravillon 4/10mm
Masse volumique réelle (t/m ³)	2,67	2,67
Absorption d'eau (%)	1,5	1,0
Minéralogie : quartz, présence de micas, feldspaths et chlorites		

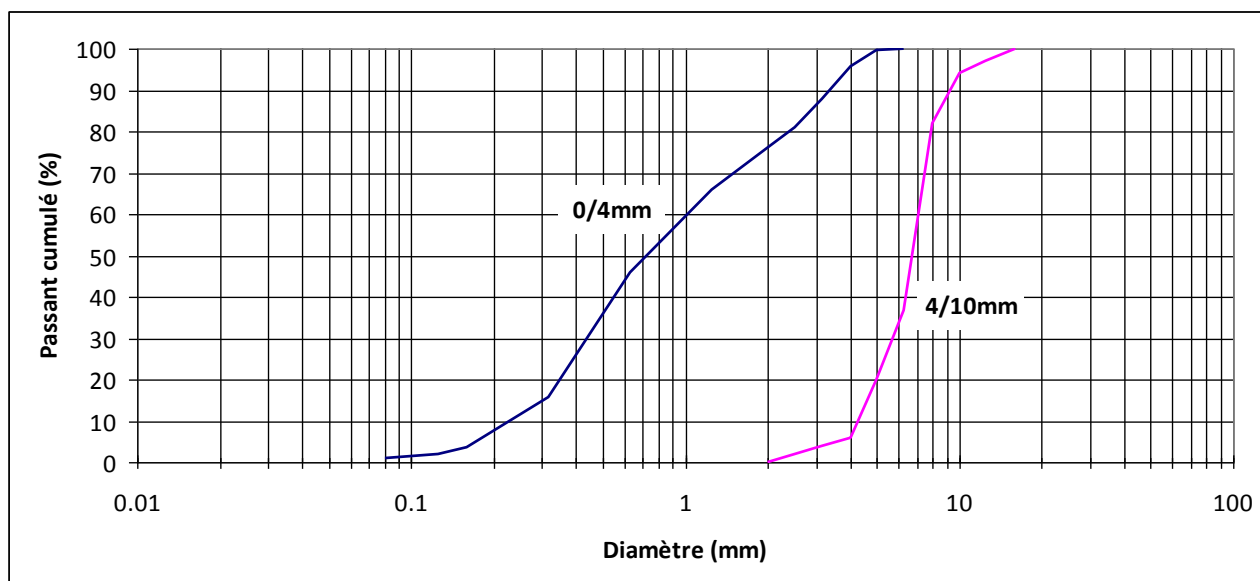


Figure 2.2 : courbes granulométriques du sable et du gravillon utilisés

2. FORMULATIONS DES BETONS ET DES PÂTES

L'effet d'une élévation de la température initiale du mélange et de la température de cure est apprécié à l'échelle des propriétés du béton aux états frais et durci, et à l'échelle des pâtes en vue d'une analyse physico-chimique plus fine afin d'expliquer les résultats obtenus sur béton. Il s'agit donc de formuler judicieusement les différents matériaux.

2.1. Formulation des bétons

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité des BAP.

Les grands principes de formulation ont été donnés par Okamura (Figure 2.3)

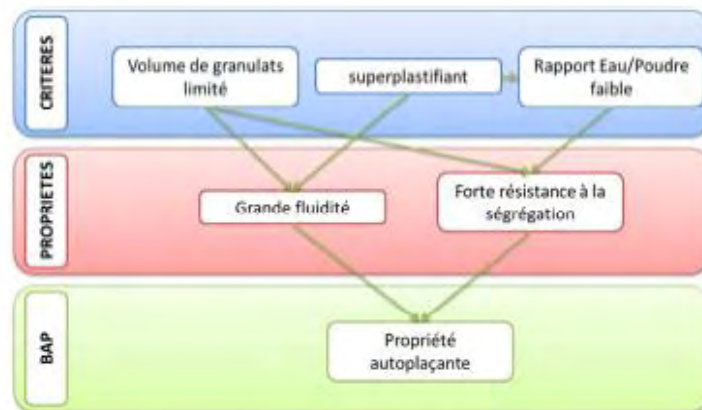


Figure 2.3 : approche générale de formulation des BAP [SKA00] cité par [DIE10].

Les approches sont essentiellement diphasiques. Elles visent l'optimisation de la pâte de ciment ou du mortier, [OKA95], [BIL99], [SAA01], ou du squelette granulaire [SED99], [SU01], ou l'optimisation de deux phases à associer [ELB05], [NAN10]. L'association des 2 phases peut considérer :

- la capacité de passage entre les armatures d'une structure considérée [OZA92], [BUI94], [TAN95] à partir d'un volume critique de granulats et d'un volume de pâte minimal assurant l'écoulement [BUI99],
- un volume de pâte minimal qui remplit les vides du squelette granulaire et une épaisseur minimale de pâte entourant les grains du squelette afin de faciliter l'écoulement du béton [ELB05]. La méthode utilisée ici s'inscrit également dans une approche diphasique pâte/granulats ; elle a été proposée par Diederich [DIE10] afin de démontrer la faisabilité autoplaçante quelle que soit la nature du filler calcaire ; elle s'applique également dans le cas de BAP incorporant du métakaolin [DIE13]. Partant d'un rapport massique entre l'addition et le ciment, d'un rapport massique entre le superplastifiant et le liant (ciment+addition), le dosage en eau qui permet l'écoulement de la pâte en adéquation avec l'autoplaçance est déterminé par la caractérisation de l'empilement des grains de ciment et d'addition en suspension (eau+superplastifiant) [WON08]. Le squelette granulaire est d'abord défini par le rapport massique gravillon/sable qui permet la plus grande compacité mesurée sous vibro-compactage [LAR00] ; l'eau retenue par ce squelette est ensuite mesurée selon une méthode de filtration sous vide [BAR77] afin de ne pas dénaturer les propriétés optimisées de l'écoulement de la pâte. Trois formulations BAP1, BAP2 et BAP3 découlent de l'approche brièvement présentée (Tableau 2.7).

BAP1 et BAP2, incorporant le ciment CEM I, diffèrent essentiellement par la quantité de filler calcaire afin d'appréhender l'effet d'une diminution de clinker et d'une augmentation de la quantité de filler sur le comportement du béton avec l'élévation de la température. La composition BAP3 est, quant à elle, basée sur l'utilisation d'un liant ternaire clinker/laitier/filler calcaire. Elle s'apparente à la composition BAP2 en ce sens qu'elle présente un dosage en CEM III qui est très proche de la quantité en liant équivalent de BAP2 ($C+kA = 350+0,25*87,5 = 372\text{kg/m}^3$).

Tableau 2.7 : compositions des bétons étudiés (kg/m^3)

Quantité pour 1m^3 du béton (teneur en air fixée à 25 l/m^3)	BAP1	BAP2	BAP3
CEM I 52,5N	292	350	-
CEM III 52,5N	-	-	370
Filler Calcaire	147,0	87,5	92,5
Superplastifiant	4,385	4,375	4,625
Sable (0/4R)	814,0	808,0	795,4
Gravillon (4/10R)	895,0	889,0	875,0
Eau d'apport	182,6	190,3	187,8
Eau efficace	164,9	172,7	170,7

Le tableau 2.8 regroupe les valeurs de liant équivalent ainsi que les rapports eau efficace /liant équivalent des 3 formulations en comparaison avec les exigences du tableau NAF1 (version 2012) inclus dans la norme EN-206-1 [EN206-1]. Les calculs du liant équivalent sont faits avec un filler calcaire remplissant les conditions de la catégorie A pour ce qui concerne le ciment CEM I (BAP1 et BAP2) et un coefficient de prise en compte k égal à 0,25. Le liant équivalent concernant BAP3 incorporant le ciment au laitier ne prend pas en compte l'addition calcaire, il est donc égal au dosage en ciment. Les exigences sur le liant équivalent minimal ont été majorées de 10% puisque $D \leq 12,5\text{mm}$.

On constate que le béton BAP1 ne satisfait pas les classes XS, XD2 et XD3, XF2 à XF4 ainsi que XA1 à XA3. Il est donc plutôt destiné à des parties d'ouvrages supportant la corrosion induite par carbonatation telles qu'un voile extérieur de bâtiment subissant des alternances d'humidité/séchage et pouvant à la limite être exposé à des chlorures transportés par voie aérienne.

La composition BAP2 peut en plus, par comparaison avec BAP1, être exposée au gel en tant que surface horizontale (jusqu'à XF3).

Tableau 2.8 : confrontation des formulations aux spécifications liées aux classes d'exposition de la norme EN 206-1 (version 2012)

Classe d'exposition/ (A/A+C) [*] _{max}	Classe résistance minimale	Liant équivalent (kg/m ³)				Eau efficace / Liant équivalent			
		Exigence minimale	BAP1	BAP2	BAP3	Exigence maximale	BAP1	BAP2	BAP3
X0/0,30	/	165				/			
XC1/0,30	C20/25	286				0,65			
XC2/0,30	C20/25	286	323,3	371,9	370,0	0,65	0,510	0,464	0,461
XC3/0,30	C25/30	308				0,60			
XC4/0,30	C25/30	308				0,60			
XS1/0,05	C30/37	363				0,55			
XS2/0,05	C30/37	363	295,8	354,6	370,0	0,55	0,557	0,487	0,461
XS3/0,05	C35/45	385				0,50			
XD1/0,30	C25/30	308	323,3	371,9	370,0	0,60	0,510	0,464	0,461
XD2/0,05	C30/37	363				0,55			
XD3/0,05	C35/45	385	295,8	354,6	370,0	0,50	0,557	0,487	0,461
XF1/0,30	C25/30	308	323,3	371,9	370,0	0,60	0,510	0,464	0,461
XF2/0,25	C25/30	330				0,55			
XF3/0,25	C30/37	347	316,3	371,9	370,0	0,55	0,521	0,464	0,461
XF4/0,05	C30/37	374	295,8	354,6	370,0	0,45	0,557	0,487	0,461
XA1/0,00	C30/37	363				0,55			
XA2/0,00	C35/45	385	292,0	350,0	370,0	0,50	0,565	0,493	0,461
XA3/0,00	C40/50	396				0,45			

* : Rapport massique maximum addition / (addition + ciment) dans le cas où CEMI est utilisé (BAP1 et BAP2)

La composition BAP3 ne satisfait pas les classes XS3, XD3, XF4, XA2 et XA3 même si pour les classes XS3, XD3 et XA2 les rapports eau efficace/liant équivalent sont en deçà de l'exigence.

En considérant les résistances des bétons de référence (confectionnés et mûris à 20°C) et en se plaçant dans les conditions les plus défavorables d'une production initiale qui doivent vérifier :

$$f_{cm} \geq f_{ck, cyl} + 4 \text{ et } f_{ci} \geq f_{ck, cyl} - 4,$$

avec

f_{cm} = résistance moyenne [MPa] obtenue sur 3 éprouvettes à 28 jours,

$f_{ck, cyl}$ = résistance caractéristique [MPa],

f_{ci} = résultat minimal individuel parmi les 3 éprouvettes testées,
on constate que BAP1 est au mieux dans la classe C35/45, BAP2 est au mieux dans la classe C40/50 et BAP3 est au mieux dans la classe C50/60. Ainsi, les classes d'exposition satisfaites du point de vue de la composition le sont également du point de vue de la classe de résistance.

2.2. Formulation des pâtes

Les pâtes sont celles déjà formulées pour établir les compositions BAP1, BAP2 et BAP3 définies au paragraphe précédent. Les compositions de ces pâtes sont données dans le tableau 2.9. Les pâtes, toujours confectionnées à 20°C, sont directement insérées dans des préservatifs et mûries dans des éprouvettes de béton afin d'avoir la même maturation que les bétons, en fonction des paramètres d'étude (température initiale du mélange, mode de cure, cf. §3).

Tableau 2.9 : formulation des pâtes (g)

	P-BAP1	P-BAP2	P-BAP3
Filler/Ciment (en masse)	0,5	0,25	0,25
Superplastifiant/Poudre (en masse)	0,01	0,01	0,01
Eau/Poudre (en masse)	0,237	0,253	0,237

3. METHODE EXPERIMENTALE : DE LA PREPARATION DES CONSTITUANTS A LA CONSERVATION DES EPROUVETTES

3.1. Préparation des constituants en fonction de la température initiale du béton

Deux valeurs de température du mélange initial ont été étudiées :

- 20°C qui constitue la référence dans les conditions de bétonnage en laboratoire (20°C \pm 2°C) ;
- 50°C qui peut être atteinte en période estivale ou par temps chaud sans précautions d'usage (granulats exposés au rayonnement solaire notamment).

Dans le but d'atteindre la température initiale de 50°C \pm 2°C en fin de malaxage, il est choisi d'associer les constituants (ciment, filler calcaire, granulats et eau) à des températures précises. Sans tenir compte de la chaleur de dissolution dégagée dès les premiers instants de contact entre le ciment et l'eau, et de la chaleur dissipée durant le malaxage, la température initiale du béton peut être calculée simplement à partir de la chaleur dégagée, exprimée en fonction de la température des constituants, de leur masse dans la composition de béton et de leur chaleur spécifique. Quelle que soit la formulation (BAP1, BAP2 ou BAP3), la valeur visée de 50°C peut être atteinte avec des températures de constituants réalistes dans la pratique :

- 20°C pour l'eau, ce qui est un ordre de grandeur acceptable de la distribution d'eau potable en période estivale ;

- 70°C pour le ciment qui peut être livré à cette température en été dès la sortie de cimenterie ;
- 70°C pour les granulats, ce qui peut être une température de surface atteinte notamment si leur couleur est sombre.

Dans le contexte du laboratoire (aire de malaxage à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) et compte tenu de l'ensemble des constituants à incorporer dans le malaxeur, il a été décidé de porter le ciment (C), le filler (F) et les granulats (G) à 80°C afin d'atteindre la température de 50°C en fin de malaxage. L'eau de gâchage (E) et le superplastifiant (SP) sont introduits dans le mélange à 20°C . Le tableau 2.10 résume les températures utilisées pour les constituants afin d'atteindre les deux températures étudiées du mélange initial.

Tableau 2.10 : combinaisons des températures des constituants et température initiale correspondante, visée en fin de malaxage

Température des constituants {(C+F) - (G+S) - (E+SP)}	Température initiale
$20^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$	20°C
$80^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$	50°C

La mise en température diffère selon le constituant.

- L'eau est préparée immédiatement avant le gâchage, la quantité souhaitée étant prélevée depuis un conteneur placé à 20°C .
- Le ciment et le filler calcaire sont placés en étuve avant le malaxage.
- Les granulats sont d'abord étuvés à 80°C durant 48 heures afin de rendre nulle leur teneur en eau ; ils sont ensuite, soit placés à 20°C dans une ambiance climatisée ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) durant 48 heures avant le malaxage, soit maintenus 48 heures supplémentaires à 80°C puis inclus dans le mélange.

3.2. Malaxage et maintien de l'autoplaçance à température initiale élevée

Chaque gâchée (45 litres) est réalisée dans un malaxeur Skako-Couvrot planétaire, à axe vertical et train valseur.

La fabrication se déroule comme suit :

- enduit de la cuve et des pales par de la pâte de ciment (ciment de la composition) pour améliorer la répétabilité de la gâchée d'une même composition ;
- introduction des constituants solides en commençant par les graviers, puis les fillers calcaires et le ciment, et en finissant par le sable ;
- malaxage à sec puis introduction de l'eau et de l'adjuvant conformément à la procédure indiquée au tableau 2.11.

Tableau 2.11 : séquence de malaxage des bétons

Action	Temps de malaxage
1- Introduction des constituants solides en commençant par les graviers, puis le filler calcaire et le ciment, enfin le sable.	1 min
2- Ajout d'eau + 1/3 du superplastifiant.	1 min et 30s
3- Ajout des 2/3 restants de superplastifiant.	1 min et 30s
4- Maintien des propriétés autoplaçantes (ajout d'eau ou de superplastifiant) à la température initiale de 50°C. Entre chaque ajustement, le béton est malaxé de nouveau.	Paliers de 30s

A noter que la durée de malaxage totale ne dépasse jamais cinq minutes lorsque la consistance doit être maintenue par ajout d'eau ou de superplastifiant à la température initiale de 50°C.

Pour maintenir les propriétés autoplaçantes lorsque la température initiale du béton est à 50°C, deux moyens peuvent être employés, soit l'ajout d'eau (dans le non-respect des règles de l'art), soit le surdosage en superplastifiant (dans le respect des règles de l'art). Après un premier contrôle de l'étalement ([cf. § 3.3](#)), les ajustements éventuels sont réalisés dans un délai maximum de 5 minutes après la fin du malaxage conventionnel (étapes 1, 2 et 3, tableau 2.11). Ces ajustements sont arrêtés lorsque l'étalement obtenu est au moins identique à celui de la référence à 20°C.

3.3. Essais à l'état frais

Les essais de caractérisation à l'état frais sont d'abord présentés en accord avec la propriété qu'ils permettent de caractériser. Ensuite, la séquence de réalisation de ces essais est précisée.

3.3.1. Etalement [NF EN 12350-8]

Le test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 500 mm (figure 2.4). Le temps mis par le béton pour atteindre un diamètre de 500mm (T_{500}) est d'abord mesuré ; il renseigne sur la vitesse de mobilité du béton. A l'arrêt de l'écoulement, la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton est obtenue. L'étalement final renseigne sur la déformabilité du béton.

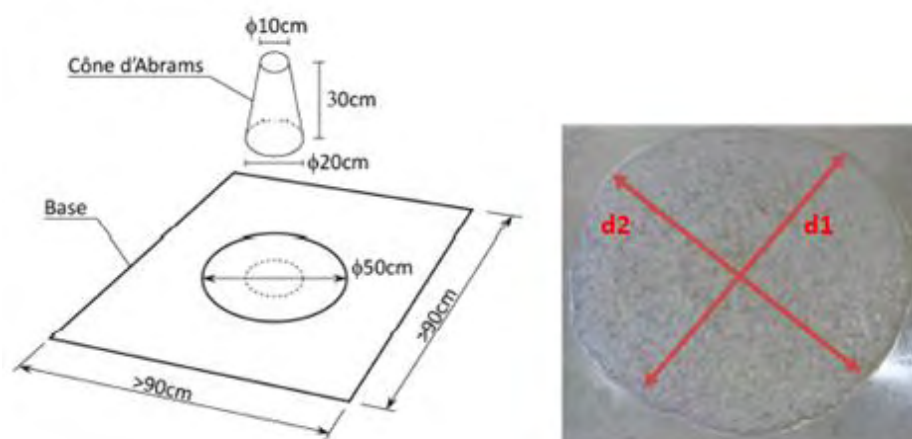


Figure 2.4 : essai d'étalement

Trois classes d'étalement sont définies par la norme NF EN 206-9 [NF EN 206-9] prévoit une répartition des BAP en trois classes (tableau 2.12).

Tableau 2.12 : classes d'étalement

Classe	Etalement en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

Deux classes de temps d'écoulement T_{500} sont définies (tableau 2.13).

Tableau 2.13 : classes de temps d'écoulement t_{500}

Classe	T_{500} en s
VS1	$< 2,0$
VS2	$\geq 2,0$

3.3.2. Boîte en L [NF EN 12350-10]

Cet essai (figure 2.5) permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures en mesurant le taux de remplissage $H2/H1$ (hauteur atteinte en partie horizontale / hauteur atteinte en partie verticale) et le temps d'écoulement T_{55} du béton à la ligne des 55 cm depuis la paroi verticale.

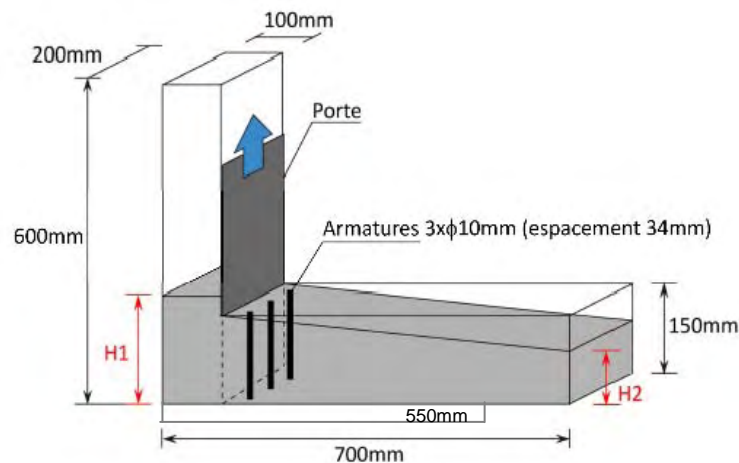


Figure 2.5 : essai a la boîte en L

Il existe deux classes en fonction du nombre d'armature (2 ou 3) avec un ratio minimal fixé à 0,80 (tableau 2.14) [NF EN 206-9].

L'ensemble des essais a été réalisé dans les conditions de la classe PL2 (3 aciers).

Tableau 2.14 : classes d'aptitude à l'écoulement - boîte en L

Classe	Taux de remplissage H2/H1
PL1	$\geq 0,80$ avec 2 armatures
PL2	$\geq 0,80$ avec 3 armatures

3.3.3. Stabilité au tamis [NF EN 12350-11]

Si les capacités de remplissage et de passage sont primordiales pour l'aspect autoplaçant du béton, il faut également que le béton soit suffisamment homogène et stable une fois mis en place pour que ses propriétés à l'état durci soient conformes aux attentes.

L'essai nécessite un seau de 10 litres avec un couvercle, un tamis de maille 5 mm, de diamètre 315 mm et un fond (figure 2.6). Le test consiste à remplir le seau de 10 litres immédiatement en fin de malaxage et à laisser le béton couvert et au repos pendant 15 minutes. Un échantillon de ce béton ($4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$) est alors versé à travers le tamis de 5 mm posé sur le fond, et laissé deux minutes, avant de peser la masse de la laitance traversant le tamis.

Deux classes sont définies (tableau 2.15) [NF EN 206-9].

Tableau 2.15: classes de résistance à la ségrégation - essai de stabilité au tamis

Classe	Pourcentage de laitance
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

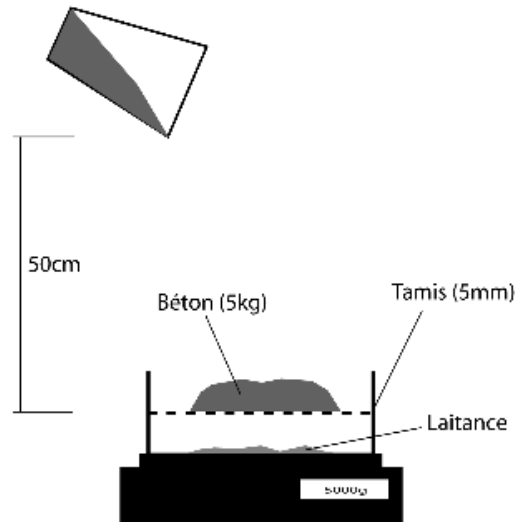


Figure 2.6 : essai de stabilité au tamis

3.3.4. Masse volumique apparente [NF EN 12350-6] et teneur en air [NF EN 12350-7]

La masse volumique apparente est systématiquement mesurée à partir du bol de l'aéromètre (8 litres) ; la quantité d'air occlus est ensuite évaluée directement à l'aéromètre à béton.

3.3.5. Teneur en eau du béton

L'évaporation d'une quantité d'eau de gâchage est inévitable lorsque la température initiale du béton est portée à 50°C. Afin de tenir compte de cette évaporation, l'eau réellement contenue dans le béton est évaluée. La mesure consiste à prélever, immédiatement à la fin du malaxage (fin de l'étape 3 ou de l'étape 4, tableau 2.11) une masse de 500 grammes environ à plusieurs points de la cuve du malaxeur pour constituer un échantillon représentatif. Ce dernier est alors placé sur une plaque chauffante et remué très fréquemment jusqu'à obtenir un mélange sec parfaitement divisé (figure 2.7).

La teneur en eau correspond à la différence de masse rapportée à la masse initiale.



Figure 2.7 : essai de teneur en eau

3.3.6. Séquence d'essai

Ne pouvant pas réaliser l'ensemble des essais de manière simultanée, une chronologie d'essai a été établie et respectée pour l'ensemble des bétons testés (Tableau 2.16).

Tableau 2.16 : *chronologie des essais à l'état frais*

Essai	Echéance
1- Immédiatement après le malaxage, un essai d'étalement est effectué	t_0
2- Un échantillon de béton est conservé à l'abri de l'évaporation (pour l'essai de stabilité au tamis qui sera réalisé au bout de 15min de repos). Ensuite en parallèle un opérateur réalise les mesures d'ouvrabilité pendant qu'un autre opérateur réalise l'essai de teneur en eau réellement contenue.	t_0
3- L'ensemble du béton est remalaxé (30 secondes) de manière à le ré-homogénéiser avant de lancer l'essai de passage à la boîte en L.	$t_0 + 10'$
4- Enfin on réalise une mesure de masse volumique et de teneur en air.	$t_0 + 15'$
5- Finalement après 15min de repos l'essai de stabilité au tamis est réalisé	$t_0 + 15'$
6- Des éprouvettes (cylindres 11cmx22cm) sont confectionnées pour la réalisation des essais à l'état durci et conservées selon les conditions définies au § 3.4	$t_0 + 20'$

$t_0 = \text{fin de malaxage}$

3.4. Conservation des éprouvettes

Après les essais à l'état frais, des corps d'épreuve cylindriques (11cm x 22cm) sont confectionnés à partir de moules étanches en carton pour éviter tout échange d'humidité avec l'extérieur.

3.4.1. Conservation durant les premières 24 heures

Durant les premières 24 heures qui suivent le coulage, les éprouvettes sont conservées :

- à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ sans échange hydrique avec l'extérieur ; ce sont les conditions de conservation normalisées des éprouvettes de contrôle* ;
- à $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ durant 5 heures avec un retour progressif à 25°C jusqu'à 24 heures ; ce sont les conditions d'un chantier ne disposant pas d'une enceinte climatisée et pour lequel la conservation des éprouvettes se ferait à l'ombre ; les éprouvettes ainsi conservées ne peuvent plus être considérées comme des éprouvettes de contrôle.

Pour chaque formulation, le nombre conséquent d'essais à l'état frais ainsi que le nombre important d'éprouvette à réaliser ont conduit à faire une gâchée pour chaque type de conservation.

Pour chaque gâchée, trois éprouvettes sont choisies au hasard afin de suivre l'histoire des températures subies en fonction des conditions de température. Pour ce faire, un thermocouple de type K est noyé dans le cœur de chaque éprouvette, après le remplissage dans le moule (figure 2.8).

* Ces conditions de conservation normalisée des éprouvettes de contrôle pour les ouvrages d'art peuvent être différentes [FASC13].

Les thermocouples sont ensuite reliés à une chaîne d'acquisition qui permet le stockage des valeurs toutes les 10 minutes, durant les 24 premières heures qui suivent le malaxage pour une conservation donnée (20°C ou 35°C).



Figure 2.8 : suivi de la température

3.4.2. Conservation entre les premières 24 heures et l'échéance d'essai

Les éprouvettes sont ensuite démoulées et soumises uniquement à une cure humide aux conditions de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et 100% d'humidité relative jusqu'à échéance d'essai.

3.5. Dénomination des bétons et des pâtes

Le Tableau 2.17 présente les dénominations que nous employons dans notre étude. Ces désignations tiennent compte de tous les paramètres.

Tableau 2.17 : dénomination des bétons

formulation	Température initiale et moyens de maintenir l'ouvrabilité (°C)	Température de conservation (1 ^{ère} 24h)
BAP1 (ciment CEM I 52,5N)	20 (tous constituants à 20°C)	20 (20°C)
BAP2 (ciment CEM I 52,5 N)	50E (ajout d'eau)	35 (35°C durant 5h)
BAP3 (ciment CEM III 52,5 N)	50SP (surdosage en superplastifiant)	

Exemple: BAP2-50E-20 est la composition 2 (BAP2), dont la température initiale est de 50°C (chauffage granulats, ciment et filler calcaire à 80°C), dont la mobilité est maintenue par ajout d'eau, conservé à 20°C dans les premières 24 heures, puis conservé à 20°C et 100% HR.

Les pâtes de ciment confectionnées pour les analyses physico-chimiques (analyses thermiques) présentent la même dénomination que les bétons, précédée de la lettre P. La mention « E » ou « SP » n'apparaît pas dans la mesure où les ajouts d'eau ou de superplastifiant n'ont pas été faits lors de la confection des pâtes

Exemple: P-BAP2-50-20 est la pâte du béton BAP2 (tableau 2.9), mûrie indifféremment dans le béton BAP2-50-20 dans la mesure où les histoires de températures des bétons sont assez similaires quel que soit le moyen de maintenir l'autoplaçance.

4. CARACTERISATION A L'ETAT DURCI

Les températures élevées, au malaxage et/ou lors de la maturation, ainsi que les conséquences sur le maintien de l'autoplaçance peuvent avoir des effets sur les propriétés mécaniques (instantanées, différées) et sur les propriétés de durabilité. Il est nécessaire de quantifier ces effets en mesurant un certain nombre de propriétés du béton à l'état durci. Les propriétés et leurs conditions de mesure sont maintenant explicitées. Les conditions d'analyse sur pâtes de ciment sont également précisées.

4.1 Essais mécaniques

4.1.1 Résistance mécanique à la compression

La résistance à la compression est déterminée conformément à la norme [\[NF EN 12390-3\]](#).

Nous utilisons, pour cet essai, des éprouvettes cylindriques de dimensions (11cm x 22cm), d'extrémités rectifiées, planes et parallèles. La charge est appliquée sur les éprouvettes par une presse hydraulique de 3000 kN contrôlée en force. La vitesse de chargement est égale à 0,5 MPa/s. Pour chaque échéance (1 jour, 7 jours ou 28 jours) et pour chaque gâchée, la résistance en compression calculée correspond à la moyenne des résistances obtenues sur 3 éprouvettes.

4.1.2 Module d'élasticité

Le module d'élasticité est déterminé à l'échéance de 28 jours suivant les recommandations [\[RILEM CPC8\]](#). Les essais sont conduits sur des éprouvettes cylindriques (11cm x 22cm) que l'on fixe à l'intérieur d'une cage extensométrique à l'aide de vis pointeaux. Un dispositif (cale + couronne) permet de centrer la cage à mi-hauteur par rapport à l'éprouvette de manière à ce que les mesures soient effectuées hors de la zone des cônes de freinage. Cette cage extensométrique est munie de 3 capteurs de déplacement longitudinaux type LVDT disposés à 120° l'un de l'autre, et de 3 autres capteurs LVDT positionnés suivant la direction radiale de l'éprouvette pour mesurer la déformation transversale et également espacés d'un angle de 120°. Les capteurs sont reliés à une chaîne d'acquisition qui enregistre les évolutions des déformations en fonction de la force. Une fois mis en place, le dispositif (cage + éprouvette) est positionné entre les plateaux de la presse hydraulique afin d'appliquer le chargement (figure 2.9).

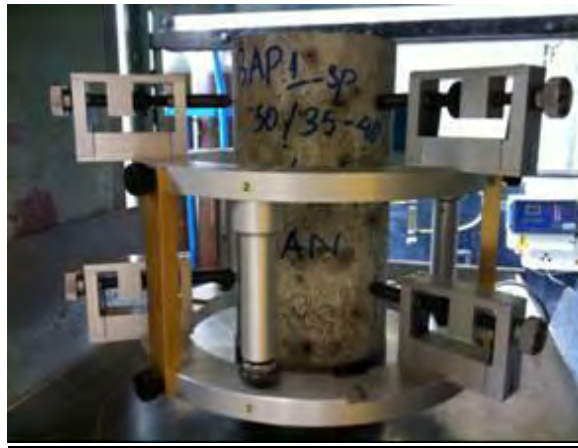


Figure 2.9 : cage extensométrique pour la mesure du module d'élasticité

Le principe de chargement consiste à effectuer dix cycles de charge et décharge d'une amplitude égale à $1/3$ de la charge de rupture, cette valeur ayant été déterminée au préalable à partir des essais de résistance en compression. La vitesse de chargement appliquée est égale à $0,5 \text{ MPa/s}$. Le module est déterminé sur la phase de la dernière montée en charge. Ensuite, cette dernière éprouvette subit un dernier chargement jusqu'à la ruine et fournit la valeur de la résistance en compression.

4.1.3 Mesures des déformations de retrait

Les protocoles expérimentaux pour les essais de retraits endogènes et totaux suivent les recommandations de la RILEM - TC 107 - CSP Standardized Tests Methods for Creep and Shrinkage [RILEM – TC 107-CSP]. Chaque éprouvette est alors coulée dans un moule dont le fond contient un insert en laiton qui servira à la positionner sur le banc de mesure. Un deuxième plot en laiton est collé à la deuxième extrémité. Le retrait endogène et le retrait total sont chacun mesurés sur deux éprouvettes. Après démoulage à 24 heures, les éprouvettes endogènes sont recouvertes sur toute leur surface par une double épaisseur de papier aluminium adhésif pour empêcher tout échange hydrique avec l'extérieur, tandis que celles servant au retrait total n'en sont recouvertes qu'à leurs extrémités pour privilégier un échange d'eau radial. Les éprouvettes sont ensuite entreposées dans une pièce dont l'ambiance est contrôlée en température ($20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) et en hygrométrie ($50 \% \pm 5 \%$). Les mesures sont effectuées axialement à l'aide d'un comparateur micrométrique suivant un rythme adapté à la cinétique des phénomènes observés (figure 2.10). De plus, les éprouvettes de retrait endogène ont été pesées régulièrement afin de vérifier l'étanchéité de la protection (absence de perte d'eau).



Figure 2.10 : système de mesure des déformations de retrait

4.1.4 Mesures des déformations de fluage

Les protocoles expérimentaux pour les essais de fluages endogène et total suivent également les recommandations de la RILEM-TC107-CSP Standardized Tests Methods for Creep and Shrinkage [RILEM – TC 107-CSP]. Le principe des essais consiste à mesurer la déformation d'une éprouvette de béton durci soumise à un effort de compression centré uniaxial, maintenu constant durant une longue durée (fluage). La déformation de fluage n'est pas une grandeur directement mesurable. Elle est évaluée après avoir retranché aux déformations totales mesurées sous charge, la déformation instantanée et les déformations différées sans charge (déformations de retrait) mesurées en parallèle aux mêmes échéances que les déformations totales sous charge. La recouvrance, obtenue au déchargement, se décompose elle aussi en recouvrance instantanée et recouvrance différée. La figure 2.11 illustre la séparation conventionnelle des déformations différées.

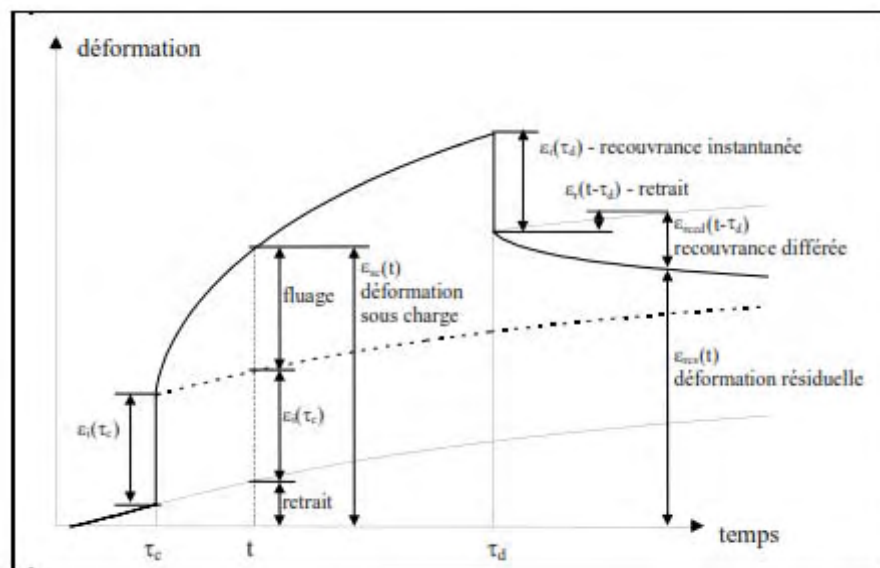


Figure 2.11 : séparation conventionnelle des déformations différées [PRO02].

Le béton est mis en place dans des moules contenant des réservations métalliques qui permettent,

une fois le béton durci, d'introduire un capteur de déplacement LVDT à l'intérieur de l'éprouvette (figure 2.12). L'erreur sur la plage de mesure choisie a été estimée de l'ordre de ± 9 microdéformations par Proust [PRO02].

Après démoulage, les éprouvettes subissent une rectification. Comme pour le retrait, deux éprouvettes sont totalement recouvertes par du papier aluminium adhésif afin de déterminer le fluage endogène. Deux autres éprouvettes n'auront que leurs extrémités protégées pour évaluer le fluage total. Elles sont ensuite entreposées dans la salle de fluage dont la température et l'hygrométrie sont maintenues respectivement à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et à $50\% \pm 5\%$.

Une éprouvette destinée à la mesure du fluage endogène et une autre destinée au fluage total sont installées par paire sur un même bâti comme montré sur la figure 2.13, ce qui permet d'appliquer le même effort quelle que soit la condition de mesure. Pour chaque gâchée étudiée, 2 bâtis sont utilisés et la charge appliquée est déterminée par la valeur moyenne de la résistance en compression à 7 jours ou à 28 jours. Un taux de charge de 40 % de cette valeur est appliqué.

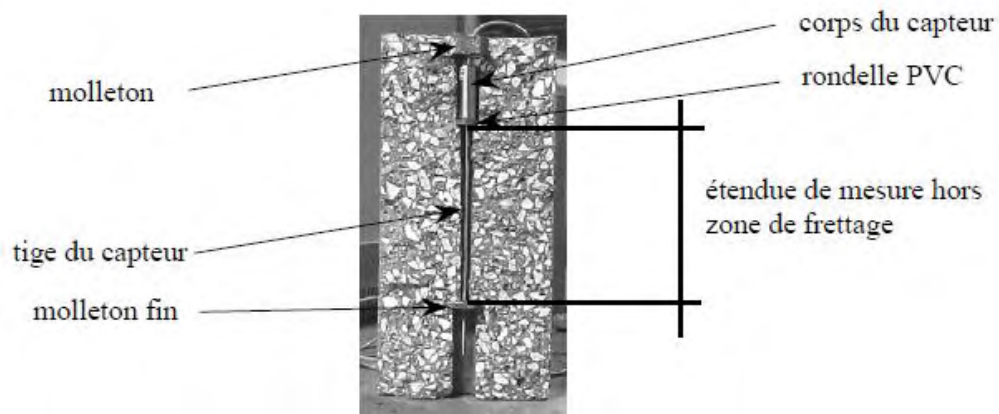


Figure 2.12 : instrumentation des éprouvettes de fluage

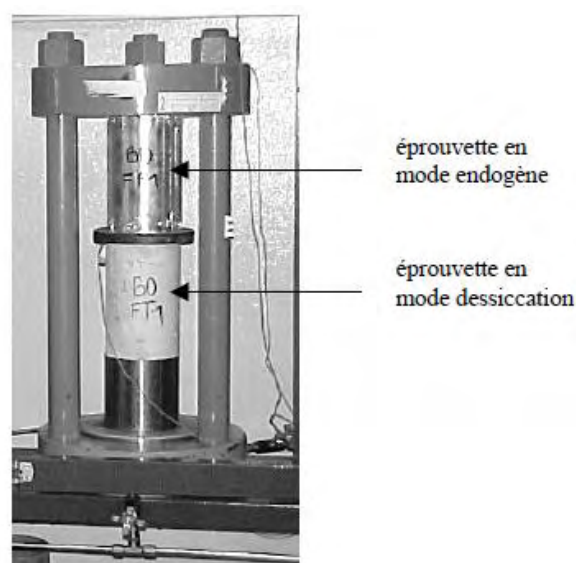


Figure 2.13 : mise en place des éprouvettes de fluage

4.2 Essais physico – chimiques et durabilité

Des caractéristiques du réseau poreux sont évaluées sur béton à l'échéance de 35 jours : le volume poreux accessible à l'eau, la taille des pores capillaires par absorption d'eau et l'inter-connectivité et la tortuosité du réseau poreux par perméabilité aux gaz. La migration des ions chlorure est également mesurée afin d'apprécier la diffusivité de cette espèce au travers du matériau.

A l'échelle des pâtes de ciment, ce sont des analyses thermiques qui sont effectuées à différentes échéances (1 et 28 jours) afin de suivre les conditions d'hydratation en fonction des conditions de température appliquées initialement et durant les premières 24 heures.

4.2.1 Porosité accessible à l'eau

L'essai permet d'évaluer un volume de pores ouverts accessibles à l'eau. La porosité ouverte, notée ε (%), correspond au rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent.

L'essai consiste à déterminer la masse d'un corps d'épreuve sec (105°C), sa masse lorsqu'il est saturé en eau et son volume apparent par pesée hydrostatique, en suivant les recommandations normalisées [NF-P18-459].

Pour chaque béton et chaque mode de conservation, trois échantillons (demi-section, épaisseur de 1cm) sont prélevés par sciage transversal en partie haute, médiane et basse d'une éprouvette. Ces échantillons sont disposés dans un dessiccateur (vide primaire maintenu pendant quatre heures). Ensuite, les échantillons sont saturés sous vide avec de l'eau durant 20 heures (figure 2.14). La masse dans l'air (m_{air}) est alors déterminée par simple pesée et la masse dans l'eau (m_{eau}) est mesurée par pesée hydrostatique. Par la suite, les éprouvettes sont placées dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante (m_{sec}). La porosité $\varepsilon(\%)$ est alors déterminée selon l'expression suivante :

$$\varepsilon = \frac{m_{\text{air}} - m_{\text{sec}}}{V} = \frac{m_{\text{air}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{air}} - m_{\text{eau}}} \times \rho_{\text{eau}} \times 100$$

Eq : 2.1

- m_{air} (kg) : masse dans l'air de l'éprouvette saturée,
- m_{eau} (kg) : masse dans l'eau de l'éprouvette saturée,
- m_{sec} (kg) : masse de l'éprouvette séchée à 105°C ,
- V (m^3) : volume apparent,
- ε (%) : Porosité accessible à l'eau.

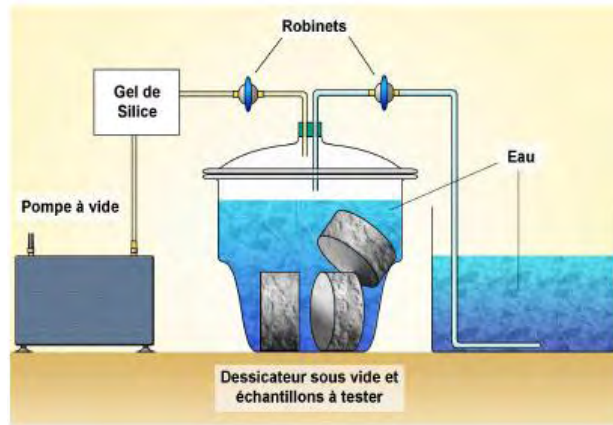


Figure 2.14: *essai de porosité accessible à l'eau*

4.2.2 Absorption d'eau

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton selon l'annexe G de [EN 13369]. Les échantillons testés sont des cylindres ($\varnothing 11 \times h 10$) cm (trois échantillons par gâchée) débités à partir de cylindres ($\varnothing 11 \times h 22$) cm. A échéance d'essai, la surface latérale est protégée par une résine. Les deux faces restantes doivent rester non protégées pour assurer l'imbibition. Les échantillons sont ensuite immergés dans de l'eau potable à une température de $20 \pm 5^\circ\text{C}$. La phase d'immersion doit durer un minimum de trois jours jusqu'à ce que la masse constante M_1 soit atteinte (la différence de masse entre deux pesées effectuées à 24 h d'intervalle est inférieure à 0,1 % de la masse de l'éprouvette).

Les éprouvettes sont ensuite placées dans une étuve au moins 3 jours ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) jusqu'à masse constante M_2 après retour à température ambiante (lorsque la différence de masse entre deux pesées effectuées à 24 h d'intervalle est inférieure à 0,1 % de la masse de l'éprouvette). La quantité d'eau absorbée en (%) s'exprime alors comme suit :

$$A_w = \frac{(M_1 - M_2) \times 100}{M_2}$$

Eq : 2.2

4.2.3 Perméabilité aux gaz

Le perméamètre CEMBUREAU à charge constante permet de déterminer la perméabilité aux gaz et en régime permanent des bétons. La disposition générale du dispositif expérimental est représentée sur la figure 2.15. Les conditions de mesure sont celles indiquées dans [AFPC97].



Figure 2.15 : perméamètre à l'oxygène CEMBUREAU

Les échantillons employés dans notre étude sont cylindriques ($\varnothing 11 \times h 5$) cm. Les éprouvettes sont ensuite soumises à un pré-conditionnement en appliquant la procédure [AFPC97]. La périphérie des disques est d'abord couverte d'une bande adhésive en aluminium, afin de limiter l'évaporation de l'humidité aux deux surfaces planes pendant toutes les procédures de séchage. Les échantillons sont séchés pendant plusieurs jours à 80°C dans une étuve, jusqu'à atteindre une masse constante finale, correspondant à un taux de saturation nul. Les échantillons sont alors sortis de l'étuve puis conservés à 20°C pour les ramener à température ambiante (figure 2.16). Cet essai est effectué pour trois valeurs de pression (2, 3 et 4 bars absolus) pour les trois échantillons. La perméabilité du béton testé est déterminée à partir de la mesure du flux de gaz qui se dégage en régime permanent.

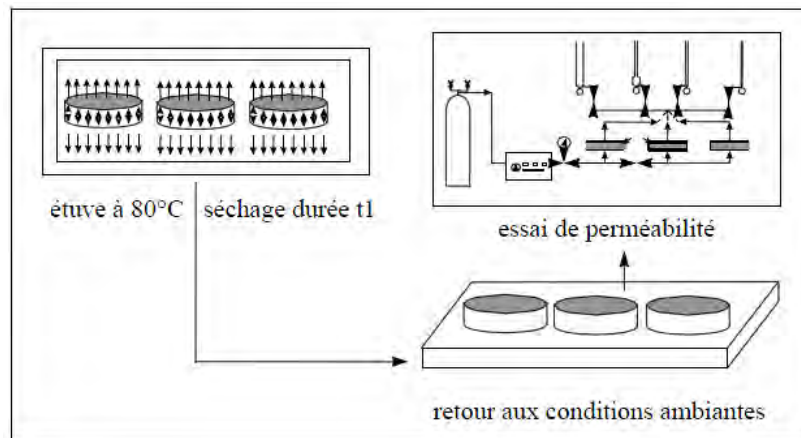


Figure 2.16 : essai de perméabilité à l'oxygène

La valeur de la perméabilité apparente (K_a) est calculée à partir de la formule issue de la loi de Poiseuille :

$$K_a = \frac{2 \cdot Q \cdot P_1 \cdot L \cdot \mu}{A \cdot (P_2^2 - P_1^2)}$$

Eq : 2.3

où Q : débit volumique mesuré à la pression atmosphérique (m^3/s),

P_1 : pression atmosphérique (Pa),

L : épaisseur d'échantillon (m),

A : section d'échantillon (m^2),

P_2 : pression appliquée à l'amont (P_a),

μ : viscosité de l'oxygène

($2,02 \cdot 10^{-5}$ Pa.s, à 20°C).

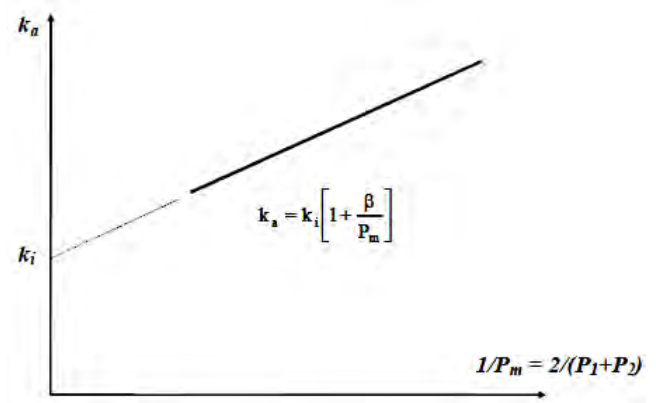


Figure 2.17 : perméabilité en fonction de l'inverse de la pression moyenne d'essai

Les valeurs de perméabilité calculées sont alors représentées en fonction de l'inverse de la pression moyenne d'essai. Les valeurs de la perméabilité intrinsèque k_i , ordonnée à l'origine, (figure 2.17) et du coefficient de Klinkenberg β , rapport entre la pente de la courbe et l'ordonnée à l'origine sont obtenus. Ces valeurs permettent d'apprécier les évolutions de réseau poreux sur des critères de connectivité et de tortuosité [ABB98].

4.2.4 Migration des ions chlorures

Le coefficient de migration effectif des ions chlore est établi à l'aide d'un essai de migration en milieu saturé en régime permanent. L'essai consiste à appliquer une différence de potentiel (12V) à un corps d'épreuve disposé entre deux compartiments contenant à l'amont une solution sans chlorures (solution à 0.3N de NaOH), et à l'aval une solution enrichie en chlorures (solution à 10% de NaCl) (figure 2.18). La procédure d'essai est décrite en détail dans [NT BUILD 492].

Avant l'essai, les trois corps d'épreuve ($\varnothing 11 \times h 5$) cm sont essuyés jusqu'à obtenir un état de surface sèche, et sont placés sous vide durant trois heures. Les échantillons sont alors saturés sous vide avec une solution d'hydroxyde de calcium durant 18 ± 2 heures.

a : Manchon en caoutchouc,
b : Anolyte,
c : Anode,
d : Echantillon,
e : Catholyte,
f : Cathode,
g : Support en plastique,
h : Boîte en plastique

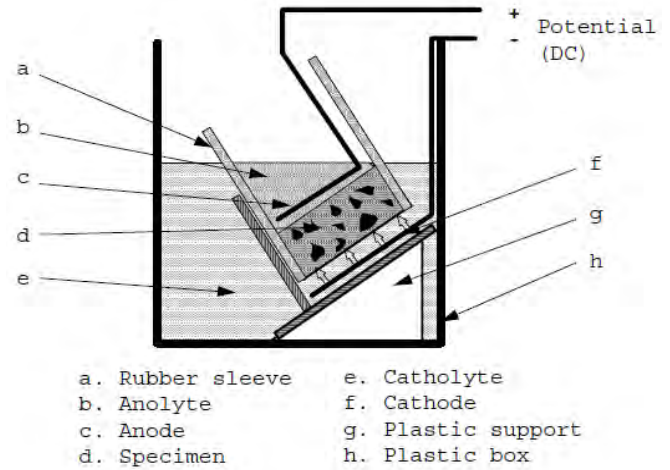


Figure 2.18 : *principe de l'essai de migration selon [NT BUILD 492]*

Suite à l'essai de migration, la profondeur du front de pénétration des ions Cl^- est déterminée à partir d'une pulvérisation de nitrate d'argent (AgNO_3). Le calcul du coefficient de migration des ions chlorure effectif (D_{nssm}) d'un corps d'épreuve s'effectue selon la formule suivante :

$$D_{\text{nssm}} = \frac{0.0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left\{ x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{(U - 2)}} \right\} \quad \text{Eq : 2.4}$$

D_{nssm} : Coefficient de migration non-stationnaire, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

U : valeur absolue de la tension appliquée, V ;

T : température moyenne initiale et finale de l'anolyte ($^{\circ}\text{C}$),

L : épaisseur de l'échantillon (mm),

x_d : valeur moyenne des profondeurs de pénétration (mm),

t : durée du test (h).

4.2.5 Analyses thermiques

Afin d'approfondir les résultats obtenus macroscopiquement à l'échelle du béton et ainsi comprendre les phénomènes engendrés par les variations de température au malaxage et au mûrissement, les analyses thermiques vont permettre d'observer les évolutions des produits d'hydratation des matrices cimentaires. Ces analyses permettront de faire une qualification et une quantification des hydrates présents dans le matériau.

a. Matériau et les échéances. Pour des raisons de représentativité du matériau testé, les essais ont été menés sur pâte de ciment, mûries dans les différents BAP étudiés (cf. § 2.2). Pour ce faire, afin de respecter au mieux l'histoire des températures lors de la maturation du béton, les pâtes ont été

noyées dans l'éprouvette de béton (cf. § 3.4).

Deux échéances d'étude ont été retenues : à court terme (1 jour) et à long terme (28 jours).

b. Arrêt de l'hydratation.

Dans la littérature, on référence différentes méthodes : le séchage par micro-onde [CAB00], au four traditionnel à 105°C pendant 24 heures [RAM88] et le remplacement de l'eau par un liquide organique comme l'alcool ou l'acétone [TAY87]. Mais les méthodes citées peuvent être contestables (endommagement des hydrates, arrêt incomplet ou trop lent de l'hydratation). A cause de ces deux problèmes majeurs, la méthode utilisée a été la lyophilisation. La lyophilisation comporte généralement trois étapes : la congélation, la sublimation et la dessiccation secondaire. Le principe de base est que lorsqu'on réchauffe de l'eau à l'état solide à très basse pression, l'eau se sublime, c'est à dire qu'elle passe directement de l'état solide à l'état gazeux. La vapeur d'eau quitte le produit et est capturée par congélation à l'aide d'un condensateur. Techniquement, l'échantillon est trempé dans un bain d'azote liquide durant 5 minutes à -196°C entraînant une congélation de la solution interstitielle (eau prise en glace). Les échantillons sont ensuite placés dans le lyophilisateur durant 24 heures, où règne une température de -40°C avec un vide de 13,3 Pa. L'eau des pores est ensuite sublimée puis capturée afin de disparaître en totalité du matériau. Les échantillons sont ensuite placés dans un dessiccateur en présence de silica-gel et de soude afin d'éviter la réhydratation et la carbonatation atmosphérique.

c. Conditionnement de l'échantillon.

Après l'arrêt de l'hydratation, les spécimens sont conditionnés en poudre pour l'essai d'ATG. Pour cela, les poudres sont broyées manuellement au mortier d'agate (taille des grains inférieure à 63µm). En effet, un broyage mécanique peut causer la détérioration de certains hydrates comme l'ettringite à cause de l'échauffement généré.

d. Analyse thermique gravimétrique (ATG)

Le principe consiste à mesurer la perte de masse engendrée par la décomposition des hydrates et de phase carbonatée lors d'une élévation de température (de la température ambiante jusqu'à 1000°C, à raison de 10°C/min). L'échantillon (poudre broyée à 63µm), de masse égale à environ 200 mg, est placé dans un creuset cylindrique en quartz. L'appareil utilisé est un dispositif Netzsch STA 499 F3 couplé au logiciel Netzsch Proteus Software pour le dépouillement et l'analyse en déconvolution de la courbe dérivée.

e. Exploitation.

Les résultats obtenus à partir d'une analyse thermique sont traités selon deux aspects selon la figure 2.19 :

- la courbe brute : pourcentage en perte de masse en fonction de la température (ATG en rouge),
- la courbe dérivée de la perte pondérale dans le temps en fonction de la température et notée dTG/dt (dTG/dt en noir).

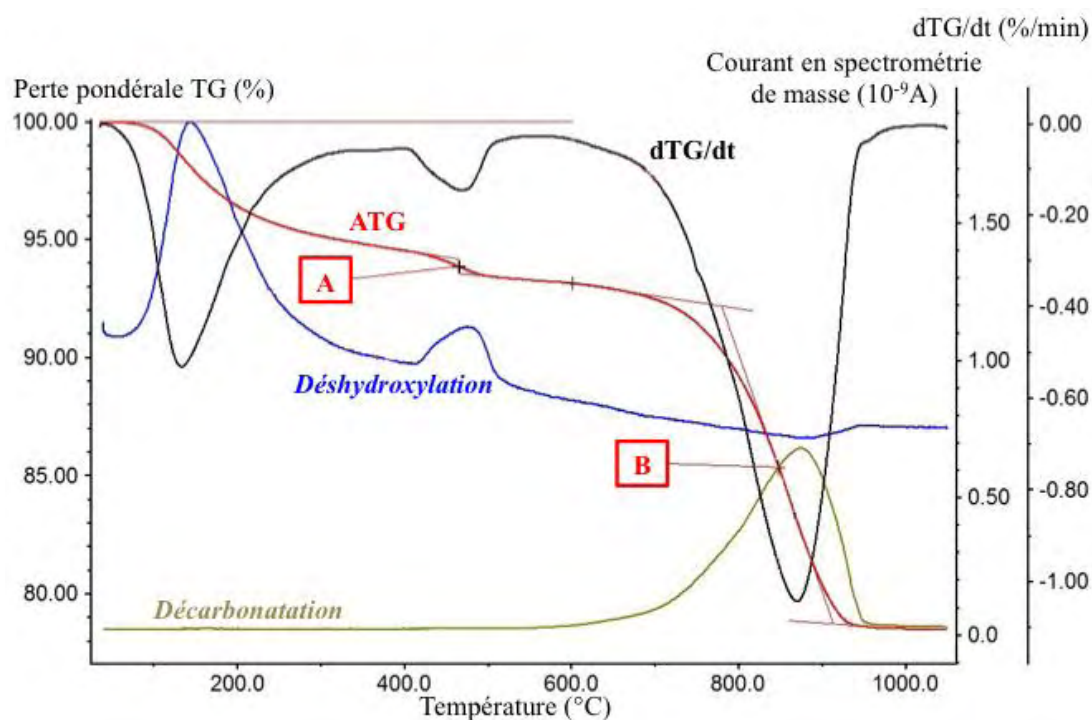


Figure 2.19 : courbes issues d'une analyse thermique et exploitations associées

En parallèle, un suivi en spectrométrie de masse permet de dissocier les pertes de masse associées à la déshydroxylation des hydrates (en bleu sur la Fig. 2.19) ou à la décarbonatation des certaines phases (en marron).

Ce type d'analyse étant bien maîtrisé, l'exploitation est réalisée grâce aux intervalles de températures de décomposition connues :

- de 30 à 105°C, l'eau évaporable est éliminée. Dans cette étude, on s'affranchit de l'eau évaporable grâce au procédé de lyophilisation,
- à partir de 80°C, l'ettringite commence à se deshydroxyler,
- de 110 à 170°C, les décompositions du gypse, avec une double réaction endothermique, de l'ettringite, de certains aluminates de calcium hydratés et des silicates de calcium hydratés (C-S-H pour 100-150°C) interviennent,
- de 180 à 350°C, la perte d'eau est due à la décomposition d'autre C-S-H et des silico-aluminates de calcium hydratés,
- de 450 à 570°C, la déshydroxylation de la portlandite CH apparaît,
- de 700 à 900°C, la décarbonatation du carbonate de calcium se produit.

A partir des deux courbes $ATG=f(T^{\circ}C)$ et $dTG/dt=g(T^{\circ}C)$, plusieurs exploitations pourront être réalisées pour un suivi des produits d'hydratation formés de court terme jusqu'au long terme.

A partir de la courbe de perte de masse (courbe rouge en Fig. 2.19), $ATG=f(T^{\circ}C)$

Avec la courbe de la variation pondérale, plusieurs informations peuvent être obtenues. Les quantités molaires de Portlandite ($Ca(OH)_2$) et de carbonate de calcium ($CaCO_3$) sont calculées à

partir de la méthode des tangentes [CAS09] sur les zones de grande variation de pente (A et B sur la Fig. 2.20 pour Ca(OH)_2 et CaCO_3 respectivement) malgré une sous-estimation quantitative par cette méthode. Une indication concernant la quantité d'eau chimique liée peut être extraite de cette courbe. Le calcul est explicité en Fig. 2.20.

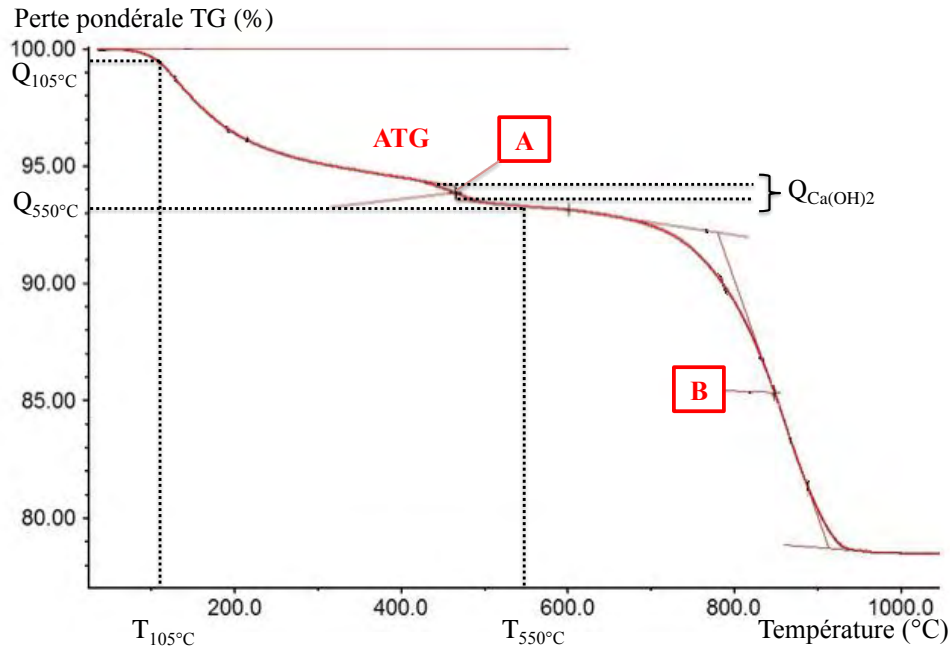


Figure 2.20 : détermination de la *quantité d'eau chimiquement liée à l'aide de l'analyse thermique gravimétrique.*

Q_i sont associées à des décompositions de quantités d'eau chimiquement liée.

$$Q_{\text{Eau chimiquement liée}} = 100 \% - Q_{550^\circ\text{C}} - Q_{\text{Ca(OH)}_2} - Q_{105^\circ\text{C}} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Avec :

$Q_{\text{Eau chimiquement liée}}$: Quantité d'eau chimiquement liée (%),

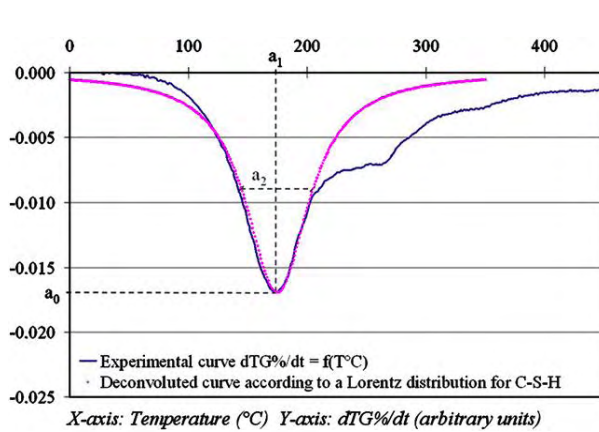
$Q_{550^\circ\text{C}}$: Quantité d'eau perdue à 550°C suite à la décomposition des hydrates (%),

$Q_{\text{Ca(OH)}_2}$: Quantité d'eau issue de la déshydroxylation de la Portlandite déterminée par la méthode des tangentes.

$Q_{105^\circ\text{C}}$: Eau évaporable à 105°C .

A partir de la courbe dérivée (courbe noir en Fig. 2.19), $dTG/dt=g(T^\circ\text{C})$

Avec la courbe dérivée, il est possible d'obtenir une semi-quantification de la quantité de C-S-H par la méthode de la déconvolution comme présenté en Fig. 2.21. On rappelle qu'il s'agit d'une méthode comparative permettant d'observer les variations de quantité de C-S-H d'une matrice cimentaire à l'autre.



$$\frac{dTG(\%)}{dt} = \frac{a_0}{1 + \left(\frac{T-a_1}{a_2}\right)^2} \quad \text{Eq.X}$$

Avec :

$dTG(\%)/dt$: valeur dérivée de $TG(\%)$ par rapport au temps,

T : température ($^{\circ}C$),

a_0, a_1, a_2 : amplitude, centre et largeur du pic, respectivement.

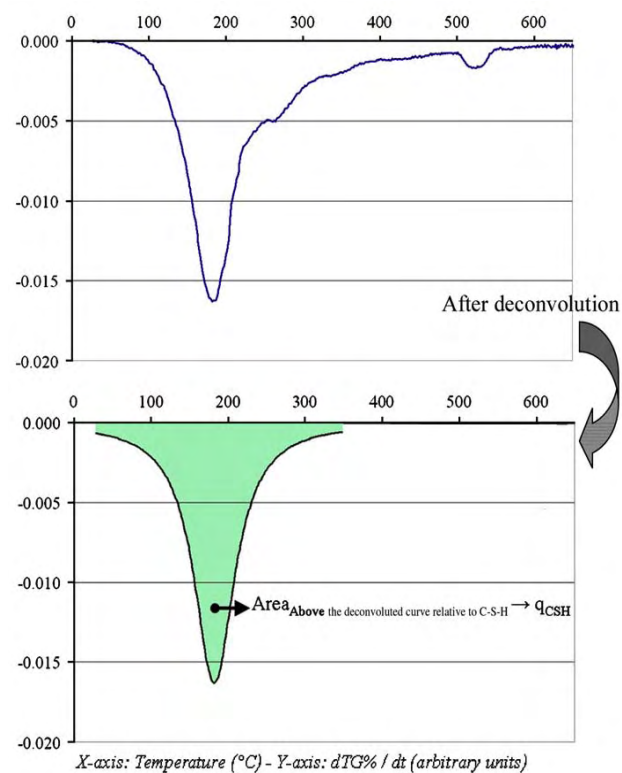


Figure 2.21 : analyse d'une courbe dérivée de la variation pondérale en utilisant la méthode de la déconvolution [CAS09]

CHAPITRE 3

Validation de l'autoplaçance à température élevée durant le malaxage

1. INTRODUCTION	68
2. RESULTATS DES ESSAIS D'OUVRABILITE.....	68
2.1 MAINTIEN DE L'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS ET AJOUTS ASSOCIES D'EAU OU DE SUPERPLASTIFIANT.....	69
2.2 ECOULEMENT A LA BOITE EN L	71
2.3 STABILITE AU TAMIS	72
2.4 EVOLUTION DES PROPRIETES D'OUVRABILITE DANS LE TEMPS LORSQUE LA TEMPERATURE DU MELANGE INITIAL EST DE 50°C	73
2.5 BILAN.....	74
3. VARIATION DES COMPOSITIONS AVEC L'ELEVATION DE LA TEMPERATURE INITIALE ET DES MOYENS DE MAINTENIR L'AUTOPLACANCE.....	74
3.1 TENEUR EN AIR	74
3.2 EAU REELLEMENT CONTENUE.....	74
3.3 BILAN.....	76

1. INTRODUCTION

L'élévation de la température initiale du béton altère inévitablement son ouvrabilité, par deux effets concomitants :

- l'évaporation de l'eau de gâchage ;
- la thermoactivation des réactions d'hydratation.

Dans ce chapitre, l'objectif est d'abord de démontrer que l'autoplaçance des bétons est maintenue à la fin du malaxage lorsque la température du mélange atteint 50°C, éventuellement par un ajout d'eau (à l'encontre des recommandations), ou par le surdosage du superplastifiant utilisé (dans le sens des recommandations). Les résultats des essais actuellement retenus à la livraison sur chantier pour tester l'autoplaçance sont alors discutés :

- étalement ;
- boîte en L ;
- stabilité au tamis.

Ensuite, il s'agira d'observer les conséquences sur la composition, de l'élévation de la température initiale et des actions éventuelles de maintien de l'autoplaçance. Les variations de la teneur en eau et en air seront notamment discutées.

Les dénominations des différents bétons avant la confection et la conservation des éprouvettes sont rappelées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: dénomination des BAP

Composition	Température initiale et moyens de maintenir l'ouvrabilité (°C)
BAP1 (ciment CEM I 52,5N)	20 (tous constituants à 20°C)
BAP2 (ciment CEM I 52,5 N)	50E (ajout d'eau)
BAP3 (ciment CEM III 52,5 N)	50SP (surdosage en superplastifiant)

Exemple: BAP1-50E est le béton de la composition 1 (BAP1), dont la température initiale est de 50°C (chauffage granulats, ciment et filler calcaire à 80°C) et dont l'autoplaçance est maintenue par ajout d'eau.

Les résultats sont systématiquement issus de deux gâchées, chacune d'elle étant dédiée à un mode de conservation des éprouvettes (20°C durant 24 heures ou 35°C durant 5 heures avec retour progressif à 25°C jusqu'à 24 heures).

2. RESULTATS DES ESSAIS D'OUVRABILITE

Il faut rappeler à ce stade que le maintien de l'autoplaçance est apprécié à partir de l'essai d'étalement. Tant que l'étalement n'est pas au moins égal à celui obtenu pour la référence confectionnée à 20°C, un ajout d'eau ou un surdosage en superplastifiant est effectué et le béton

malaxé 30 secondes supplémentaires. Lorsque l'étalement est atteint (c'est toujours le cas à l'issue de deux ajouts), les autres essais sont alors réalisés selon la chronologie explicitée au chapitre 2 (§3.3.6).

2.1 Maintien de l'étalement au cône d'Abrams et ajouts associés d'eau ou de superplastifiant

La figure 3.1a montre que l'étalement a été maintenu par des ajouts d'eau ou de superplastifiant lorsque la température du mélange a été augmentée à 50°C, dans le cas des bétons incorporant du ciment CEM I (BAP1 et BAP2). Par ailleurs, pour la même élévation de la température initiale, aucun ajout n'a été nécessaire pour maintenir l'étalement du béton incorporant le ciment CEM III. Selon la norme EN 206-9 [EN 206-9], tous les bétons répondent à la classe SF2 (figure 3.1a) et majoritairement à la classe VS1 (temps de passage au diamètre de 50 cm, T_{50} , figure 3.1b).

La figure 3.2 précise les ajouts impliqués pour maintenir l'étalement. Les ajouts d'eau sont d'environ 12 litres/m³ pour BAP1 et BAP2. En revanche, le surdosage en superplastifiant est légèrement plus marqué dans le cas de BAP2 (1,47 kg/m³) que dans le cas de BAP1 (1,29 kg/m³). Il semble donc que, dans le contexte expérimental, l'évaporation d'eau inévitable à température élevée et que nous quantifierons au §3, doit être compensée par une plus grande quantité de superplastifiant pour maintenir l'étalement lorsque le dosage en ciment CEM I est plus élevé. C'est d'ailleurs le dosage en clinker qui peut apparaître prédominant, au-delà de la nature du ciment. En effet, le ciment CEM III présente le même clinker que le ciment CEM I mais à une quantité moindre (cf tableau 2.1, chapitre 2) si bien que BAP3 ne comporte que 220 kg/m³ de clinker qui peut être presque directement comparé à une teneur en ciment CEM I. Dans ce cas, nous l'avons déjà observé, aucun ajout n'a été nécessaire. Ce résultat va dans le sens des recommandations de limiter la teneur en clinker afin d'éviter l'échauffement des pièces massives, mais pour une raison supplémentaire.

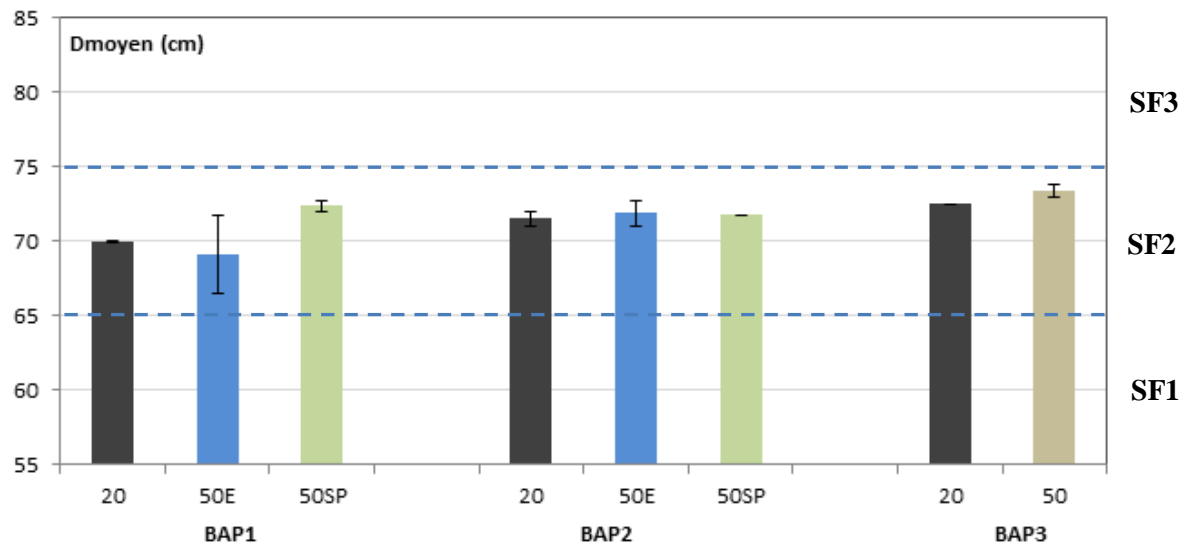


Figure 3.1a

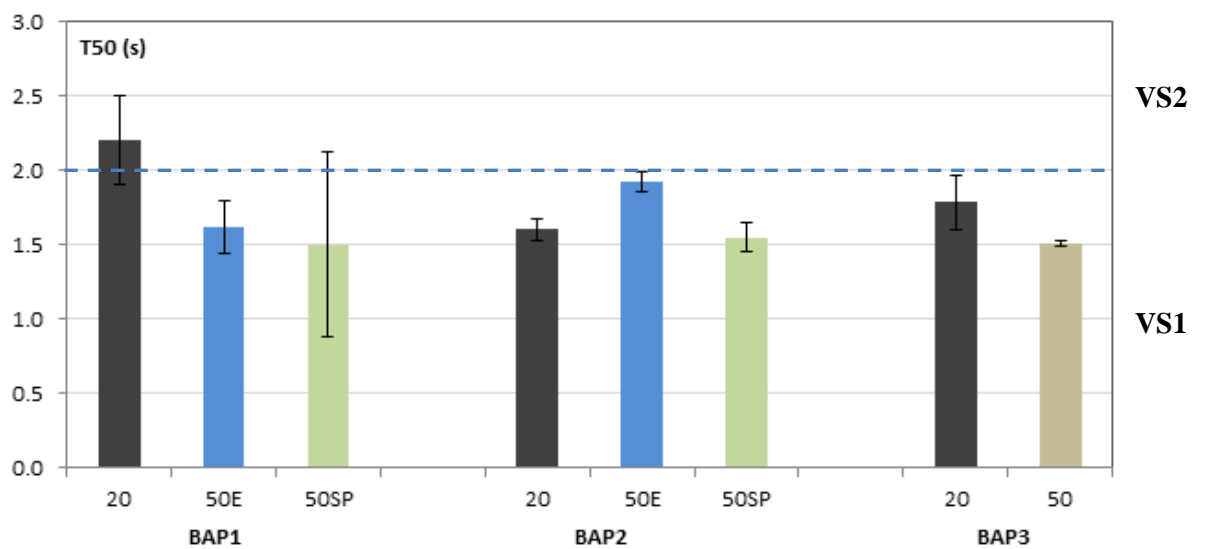
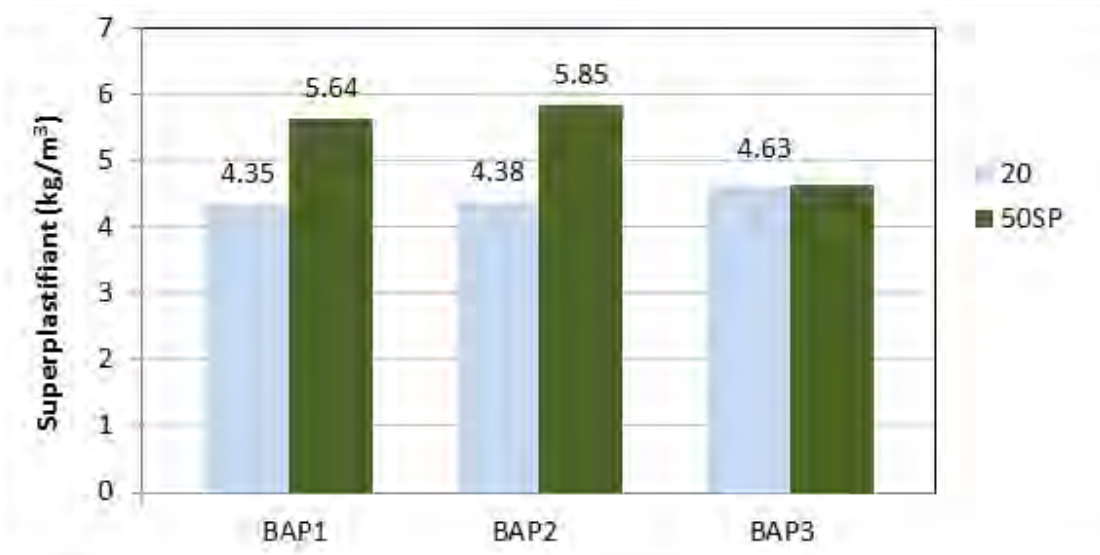


Figure 3.1b

Figure 3.1 : effet des ajouts (eau ou superplastifiant) ou non sur l'essai d'étalement immédiatement après le malaxage (D_{moy} et T_{50}) lorsque la température initiale augmente de 20°C à 50°C



a) Ajout d'eau



b) Ajout de superplastifiant

Figure 3.2 : ajouts d'eau ou de superplastifiant impliqués pour maintenir l'étalement lorsque la température initiale du mélange est de 50°C (quantités calculées pour un volume d'air fixé à 25 l/m³)

2.2 Ecoulement à la boîte en L

La figure 3.3 présente les rapports H2/H1 moyens (sur deux gâchées) obtenus pour l'ensemble des bétons testés. On constate que les ajouts d'eau ou de superplastifiant, réalisés pour maintenir l'étalement à la température initiale de 50°C dans le cas de BAP1 et BAP2, sont également efficaces pour conserver la capacité de passage à la boîte en L. L'absence de ces ajouts n'altère pas la capacité de passage de BAP3. Dans tous les cas, les valeurs de H2/H1 sont supérieures ou égales à 0,8 compte tenu des dispersions obtenues, ce qui classe les bétons dans la catégorie PL2 au sens de la norme EN 206-9 [EN 206-9]. En nuancant un peu les résultats obtenus, il apparaît que le

surdosage en superplastifiant est plus efficace que l'ajout d'eau, ce qui confirme encore l'intérêt de rester dans le cadre des recommandations vis-à-vis du bétonnage par temps chaud.

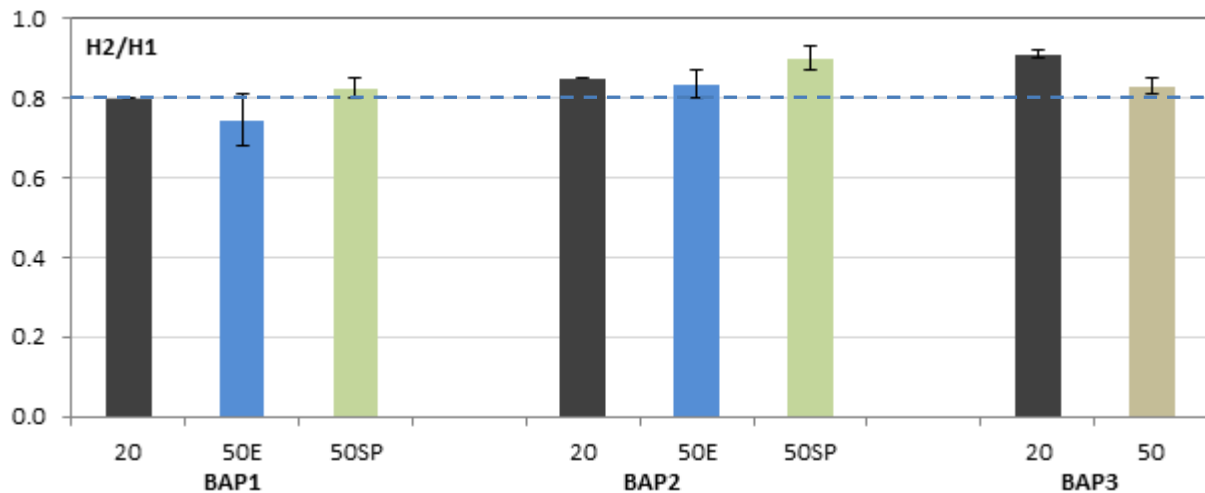


Figure 3.3 : effet des ajouts (eau ou superplastifiant) ou non sur le rapport H2/H1 obtenu à la boîte en L immédiatement après l'essai d'étalement lorsque la température initiale augmente de 20°C à 50°C

2.3 Stabilité au tamis

La figure 3.4 présente le pourcentage de laitance π passant au tamis de 5 mm, pour chaque échantillon de béton (10 litres) prélevé à la fin du malaxage et laissé au repos durant 15 minutes. Les ajouts d'eau ou de superplastifiant peuvent diminuer la stabilité des bétons BAP 1 et BAP 2 mais ne l'altèrent pas au sens de la norme EN 206-9 [EN 206-9] puisque la classe SR1 n'est pas dépassée ($\pi > 20\%$). Le mélange BAP3 qui n'a pas nécessité d'ajout pour maintenir l'étalement à la température initiale de 50°C, présente une stabilité accrue. Ce dernier résultat n'est pas surprenant dans la mesure où une évaporation d'une part de l'eau de gâchage s'est produite durant le malaxage (cf § 3).

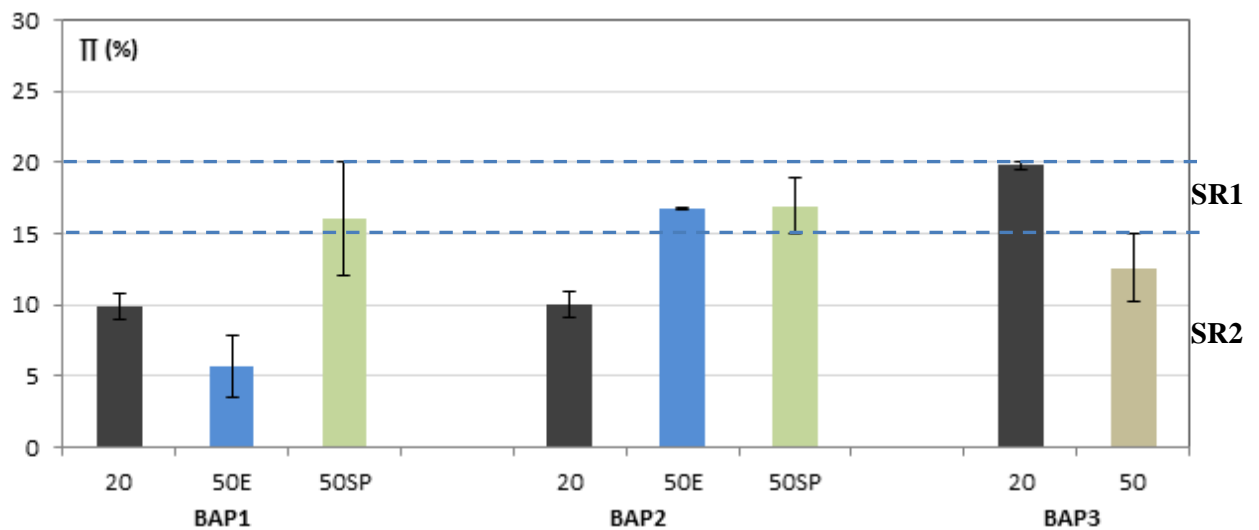


Figure 3.4 : effet des ajouts (eau ou superplastifiant) ou non sur le % de laitance π mesuré 15 minutes après la fin du malaxage lorsque la température initiale augmente de 20°C à 50°C

2.4 Evolution des propriétés d'ouvrabilité dans le temps lorsque la température du mélange initial est de 50°C

Quelques vérifications ponctuelles ont été faites pour apprécier l'évolution de l'ouvrabilité des bétons confectionnés à 50°C dans les 25 minutes qui suivent la fin du malaxage t_0 (tableau 3.2). Cette échéance correspond généralement à la durée maximale qui existe entre la fin du malaxage et la mise en place du béton dans les moules. On constate que les bétons demeurent autoplaçants.

Tableau 3.2 : évolution des propriétés d'écoulement dans la période d'utilisation des bétons confectionnés à 50°C (t_0 = fin du malaxage)

	D _{moy} (cm)		T ₅₀ (s)		H2/H1		T ₅₅ (s)	
BAP1 50E-35	t_0+1	t_0+15	t_0+1	t_0+15	/		/	
	67,0	66,5	1,7	1,4				
BAP1 50SP-35	t_0+1	t_0+25	t_0+1	t_0+25	/		/	
	72,0	68,0	0,9	3,2				
BAP2 50E-20	t_0+1	t_0+10	t_0+1	t_0+10	t_0+5	t_0+20	t_0+5	t_0+20
	71,0	73,0	1,7	1,9	0,85	0,80	1,1	1,4
BAP3 50 - 35	t_0+1	t_0+15	t_0+1	t_0+15	t_0+5	t_0+20	t_0+5	t_0+20
	74,0	76,5	<1	1,5	0,85	0,80	1,1	1,4

T_{55} : temps d'écoulement pour atteindre la distance de 55cm en partie horizontale de la boîte en L.

2.5 Bilan

Les résultats montrent que les bétons de référence confectionnés à 20°C et formulés selon la méthode développée par Diederich et al. [DIE10] sont autoplaçants et qu'ils le restent lorsqu'ils sont réalisés à 50°C. Dans certains cas (BAP1 et BAP2), des ajouts d'eau ou un surdosage en superplastifiant sont nécessaires pour maintenir l'autoplaçance ; ces ajouts ne sont pas nécessaires dans le cas de BAP3 incorporant le ciment au laitier CEM III.

A ce stade, on peut se demander quelles sont les conséquences de l'élévation de la température initiale et des éventuels ajouts d'eau ou de superplastifiant sur les variations de compositions. Il s'agit d'analyser maintenant ces variations à partir des mesures de teneur en air et en eau réellement contenue dans les bétons.

3. VARIATION DES COMPOSITIONS AVEC L'ELEVATION DE LA TEMPERATURE INITIALE ET DES MOYENS DE MAINTENIR L'AUTOPLACANCE

3.1 Teneur en air

La figure 3.5 présente les teneurs en air occlus mesurées sur les différentes gâchées de béton. La dispersion reportée pour chaque mesure correspond à $\pm 4 \text{ l/m}^3$. Cette valeur correspond à l'écart moyen enregistré entre 2 gâchées d'un béton donné confectionné à une température initiale donnée.

L'élévation de la température initiale et les moyens éventuels de maintenir l'autoplaçance n'induisent pas une variation significative de la quantité d'air occlus dans le cas de BAP1 et BAP2. Cette quantité se situe le plus probablement entre 15 et 20 l/m^3 pour BAP1, 15 l/m^3 pour BAP2. Concernant BAP3, le volume d'air occlus semble augmenter avec l'élévation de la température initiale au malaxage. Dans ce cas, l'évaporation d'eau inévitable à 50°C n'est pas contrecarrée par un ajout d'eau ou de superplastifiant et peut contribuer à accentuer la teneur en air.

3.2 Eau réellement contenue

Afin de quantifier l'évaporation existante lorsque la température initiale du béton est portée à 50°C, l'eau réellement contenue E_{rc} a été mesurée selon la procédure décrite au chapitre 2 (§3.3.5). La figure 3.6 reporte, pour chaque gâchée, les valeurs de E_{rc} correspondant aux teneurs en air mesurées ainsi que les incertitudes. Ces dernières sont calculées à partir des incertitudes sur les pesées initiale (béton frais) et finale (résidu sec), ainsi que sur la masse volumique apparente du béton frais. Les incertitudes sur l'eau retenue sont comprises entre 2 l/m^3 et 4 l/m^3 .

Concernant BAP1 et BAP2, il est important de noter que, aux incertitudes près, l'eau réellement contenue est comparable entre les bétons de référence à 20°C et les bétons à 50°C pour lesquels on a ajouté de l'eau afin de maintenir l'autoplaçance. Ainsi, ces ajouts d'eau ont été compensés par l'évaporation. Pour ces mêmes compositions BAP1 et BAP2, la quantité E_{rc} a tendance à diminuer lorsque des ajouts en superplastifiant ont été effectués, par comparaison aux autres cas (20 ou 50E). Une évaporation d'eau existe donc, mais elle n'est pas significative. En revanche, pour le béton incorporant le ciment CEM III, la quantité E_{rc} est significativement plus faible à 50°C qu'à 20°C (environ 12 l/m³ en moyenne sur les 2 gâchées). L'évaporation est alors conséquente mais prévisible puisqu'il n'y a eu ni ajout d'eau, ni surdosage en superplastifiant dans ce cas.

A ce stade encore, la nature du liant ou la quantité de clinker joue un rôle important dans le phénomène d'évaporation. Plus la quantité de clinker est grande et plus l'eau de gâchage est fixée rapidement, ce qui limite l'évaporation. C'est une tendance que Mouret [MOU97] avait noté sur béton vibré en utilisant un ciment CEM II/B à la place d'un ciment CEM I. En revanche, les ajouts d'eau pour maintenir la consistance des bétons vibrés étaient plus accentués (jusqu'à 21 l/m³ en moyenne) que dans le cas des BAP (12 l/m³ pour BAP1 et BAP2). Cela s'explique par l'absence du superplastifiant dans les bétons vibrés.

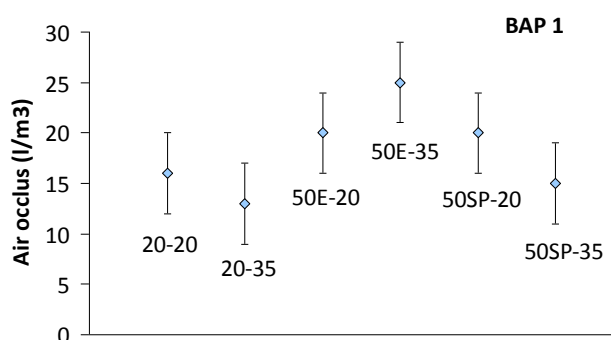


Figure 3.5a

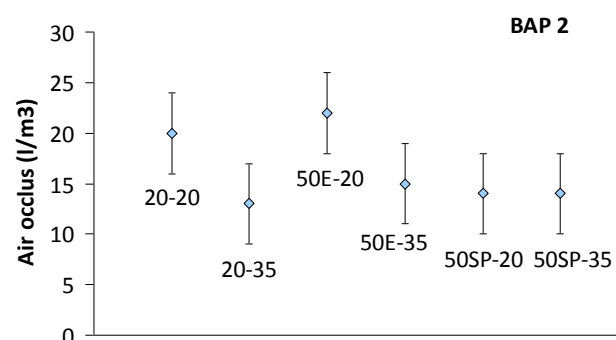


Figure 3.5b

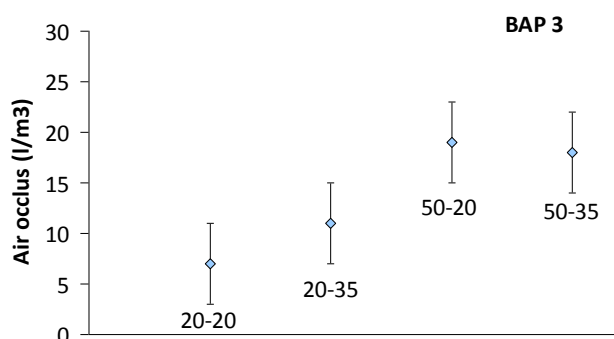


Figure 3.5c

Figure 3.5 : volume d'air occlus des bétons confectionnés à 20°C ou 50°C (2 gâchées selon le mode de conservation, 20 ou 35, pour un béton donné à une température initiale donnée)

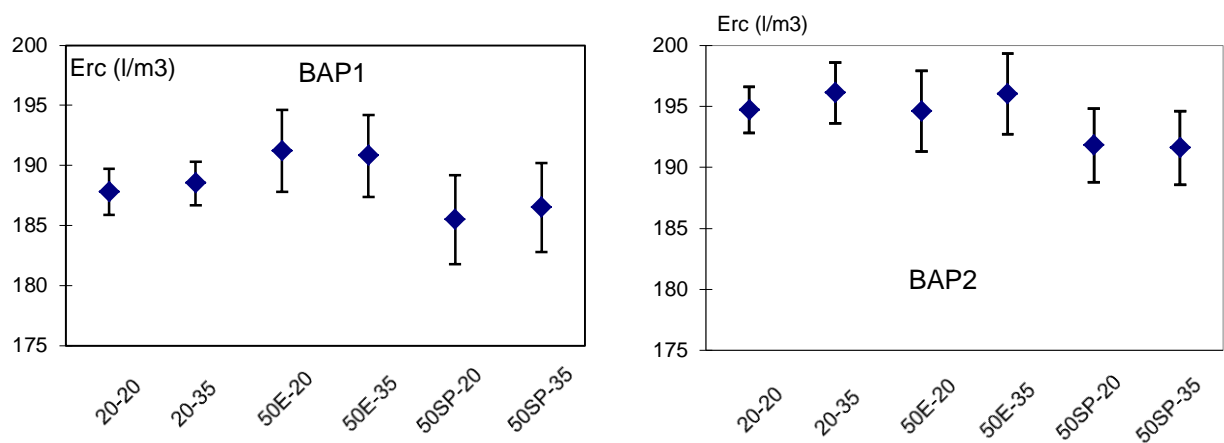


Figure 3.6a

Figure 3.6b

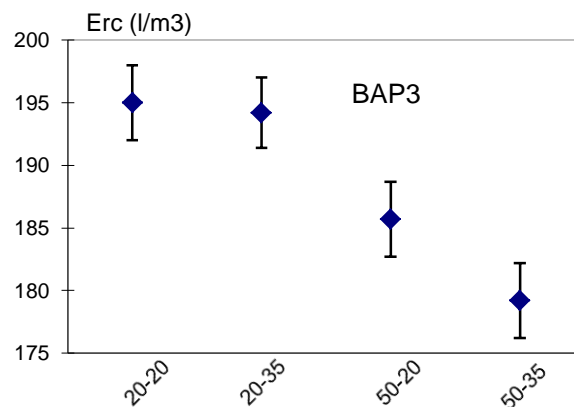


Figure 3.6c

Figure 3.6 : eau réellement contenue dans les bétons confectionnés à 20°C ou 50°C (2 gâchées selon le mode de conservation, 20 ou 35, pour un béton donné à une température initiale donnée)

3.3 Bilan

L'élévation de la température initiale du mélange de 20°C à 50°C et ses conséquences sur le maintien de l'autoplaçance n'induit pas des variations significatives des teneurs en air et de l'eau réellement contenue dans les bétons incorporant le ciment CEM I (BAP1 et BAP2). En revanche, la même élévation de température provoque une diminution de l'eau réellement contenue et une augmentation de la teneur en air dans le béton incorporant le ciment CEM III (BAP3). La fixation moins importante de l'eau de gâchage favorise l'évaporation dans le cas de BAP3 incorporant un liant ternaire (clinker+laitier+filler calcaire) contenant moins de clinker que les bétons BAP1 et BAP2. Néanmoins, le maintien de l'autoplaçance dans le cas de BAP3 est dû à la présence du superplastifiant. Ce dernier limite même les ajouts d'eau dans le cas de BAP1 et BAP2 incorporant un liant binaire (clinker+filler calcaire). Les effets d'une température élevée au malaxage sur le maintien de l'autoplaçance et les conséquences sur la formulation sont moins marqués que ceux relevés dans le cadre des bétons traditionnels vibrés, testés dans le même contexte expérimental [MOU97]. Il s'agit d'observer dans le chapitre suivant l'incidence, sur les

résistances mécaniques, des actions menées à l'état frais et des variations de composition associées, en incluant également le mode de conservation des éprouvettes.

CHAPITRE 4

Résultats des essais mécaniques instantanés

1.	INTRODUCTION	80
2.	RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION A 1 JOUR, 7 JOURS ET 28 JOURS.....	80
2.1	TEMPERATURE INITIALE AU MALAXAGE ET ACTIONS POUR MAINTENIR L'AUTOPLAÇANCE	80
2.2	TEMPERATURE DE CONSERVATION DES EPROUVETTES DURANT LES PREMIERES 24 HEURES.....	82
3.	MODULE SECANT A LA COMPRESSION A 28 JOURS.....	84
4.	BILAN.....	85

1. INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons validé l'autoplaçance des bétons malaxés à température élevée. Que des additions d'eau (contraire aux recommandations) ou un surdosage en superplastifiant (dans le sens des recommandations) aient été nécessaires ou non pour maintenir l'autoplaçance, des variations de composition ont été mises en évidence, liées à l'évaporation de l'eau et à des teneurs variables en air occlus. A ces variations s'ajoute le mode de conservation des éprouvettes durant les premières 24 heures, soit à 20°C et sans échanges hydriques (conservation normalisée des éprouvettes de contrôle), soit à 35°C et sans échanges hydriques durant 5 heures avec retour progressif à température ambiante (simulation d'un chantier ne disposant pas d'enceinte climatisée après réalisation des éprouvettes dites de contrôle). Dans ce chapitre, nous étudions l'incidence des actions menées à l'état frais et du mode de conservation sur les résistances à la compression mesurées à 1 jour, 7 jours et 28 jours ainsi que sur les modules sécants mesurés à 28 jours.

2. RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION A 1 JOUR, 7 JOURS ET 28 JOURS.

La procédure de mesure de la résistance à la compression est décrite au chapitre 2 (§ 4.1.1). L'ensemble des résultats apparaît en annexe 2.

2.1 Température initiale au malaxage et actions pour maintenir l'autoplaçance

Dans ce paragraphe, nous présentons l'évolution des résistances, mesurées sur éprouvettes de contrôle, des BAP mis en œuvre à 50°C et pour lesquels l'autoplaçance a pu être maintenue, soit par un ajout d'eau, soit par un surdosage en superplastifiant. Ces évolutions sont comparées à celle des BAP de référence dont la température initiale est de 20°C (figures 4.1).

Dans le cas des bétons BAP1 et BAP2 incorporant le ciment CEM I, la hausse de la température de confection de 20°C à 50°C tend à induire une augmentation des résistances à 1 jour, 7 jours et 28 jours, quels que soient les moyens de maintenir l'autoplaçance (figures 4.1a et 4.1b). Seule la résistance à 1 jour de BAP2 50SP-20 est équivalente à la référence. Ce retard de résistance par rapport à BAP2 50E-20 est dû vraisemblablement au surdosage en superplastifiant qui conduit à une plus faible maturité d'après le suivi des températures ; l'effet retard du superplastifiant est d'ailleurs très marqué par comparaison à BAP1 (figure 4.2).

Au chapitre 3, nous avons vu que les variations d'eau réellement contenue et d'air occlus n'étaient pas significatives entre la référence (BAP1 20 ou BAP2 20) et les bétons confectionnés à 50°C (BAP1 50E ou BAP2 50E, et BAP1 50SP ou BAP2 50SP). Les augmentations de résistance à 50°C

sont alors imputables à la maturité et à son interaction avec le système (ciment, superplastifiant, filler calcaire).

Ces résultats positifs sont à comparer, dans le même contexte expérimental, avec ceux obtenus sur bétons traditionnels vibrés et qui montraient une baisse de résistance dès 7 jours lorsque la consistance était maintenue par ajouts d'eau à 50°C [MOU97]. Ces bétons vibrés, réalisés avec un CEM I, n'incluaient pas de filler calcaire et de superplastifiant ; de plus, les ajouts d'eau n'étaient pas totalement compensés par l'évaporation, contrairement aux BAP.

En regardant maintenant le béton BAP3, on observe des résistances totalement similaires à 1 jour, 7 jours et 28 jours lorsque la température au malaxage augmente de 20°C à 50°C (figure 4.1c). Les variations de maturité au jeune âge, mais également des variations avérées des teneurs en air occlus et en eau réellement contenue (chapitre 3) sont à l'origine de ce résultat sans que l'on puisse, à ce stade, juger d'un effet positif du système (liant ternaire ; superplastifiant) avec l'élévation de la température.

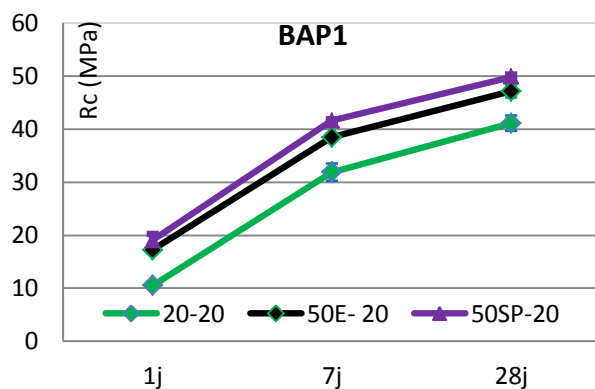


Figure 4.1a

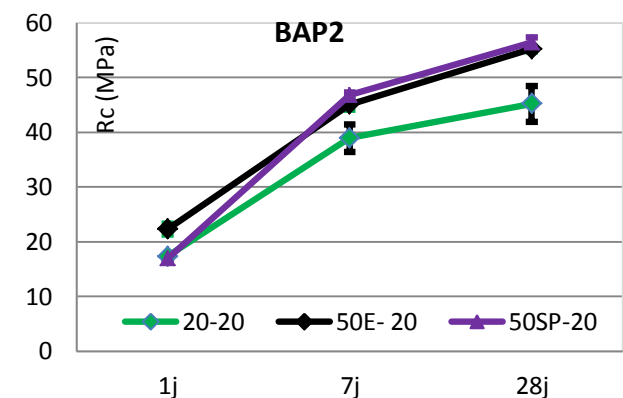


Figure 4.1b

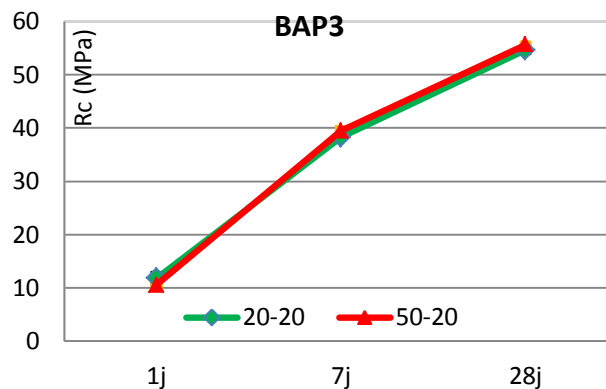


Figure 4.1c

Figures 4.1 : évolution des résistances à la compression en fonction des moyens de maintenir l'autoplaçance avec l'élévation de la température initiale à 50°C – comparaison à la température initiale de 20°C

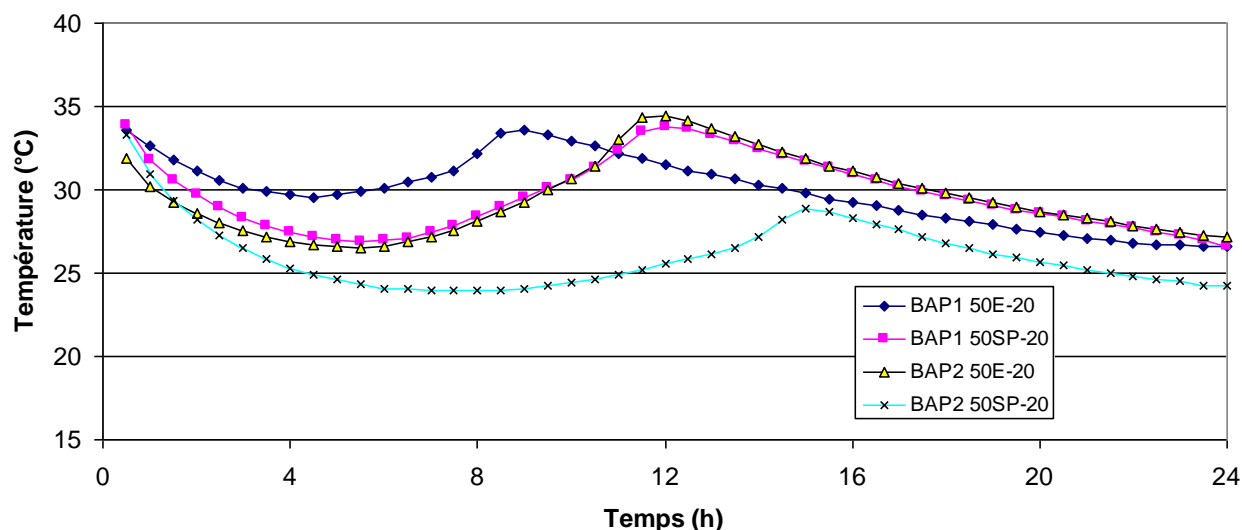


Figure 4.2 : évolution entre 30 minutes et 24 heures après le malaxage des températures moyennes (3 éprouvettes) des bétons confectionnés à 50°C et conservés à 20°C – BAP1 et BAP2

2.2 Température de conservation des éprouvettes durant les premières 24 heures

Le premier point à mettre en évidence est qu'une température de mûrissement élevée aux très jeunes âges conduit à une histoire des températures nettement différente de celle enregistrée sur les bétons de référence (figure 4.3 à titre d'exemple typique).

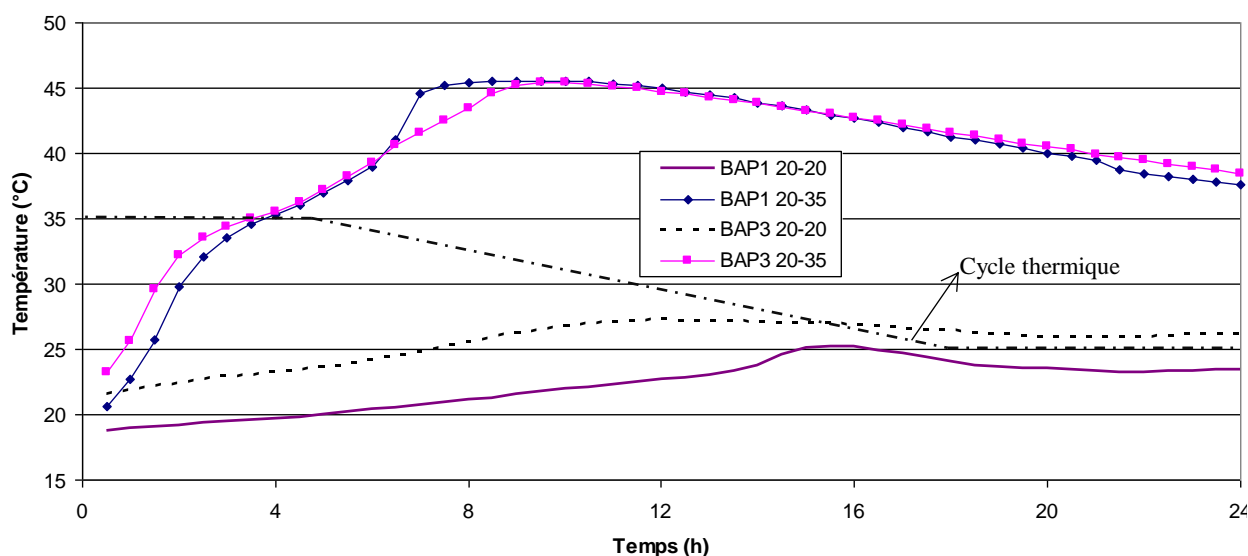


Figure 4.3 : évolution entre 30 minutes et 24 heures après le malaxage des températures moyennes (3 éprouvettes) des bétons confectionnés à 20°C et conservés soit à 20°C, soit à 35°C durant 5 heures – BAP1 et BAP3

Dans ce paragraphe, pour un BAP donné, nous comparons l'évolution des résistances mesurées sur éprouvettes mûries à 20°C sans échanges hydriques durant les premières 24 heures (éprouvettes strictement de contrôle) et sur éprouvettes mûries à 35°C sans échanges hydriques durant 5 heures, avec refroidissement progressif jusqu'à 25°C de 5 heures à 24 heures après le malaxage (éprouvettes qui ne peuvent pas être considérées légitimement comme éprouvettes de contrôle). Les

comparaisons correspondent à 3 cas pour chaque béton BAP1 et BAP2 et à 2 cas pour le béton BAP3, soit 8 cas de figure en tout. Le tableau 4.1 résume les comparaisons de résistance.

Tableau 4.1 : évolution de la résistance à la compression obtenue à 1j, 7j et 28j, après maturation à 35°C durant les 5 premières heures par comparaison à la maturation de référence à 20°C

	BAP1			BAP2			BAP3	
	20	50E	50SP	20	50E	50SP	20	50
1j	+	+	+	+	-	+	+	+
7j et 28j	≈	≈	+	≈	≈	-	-	≈

« + » = augmentation ; « ≈ » = équivalence ; « - » = diminution

A partir du tableau 4.1, la plus grande maturité obtenue avec la conservation à 35°C durant les 5 premières heures après le malaxage conduit à des résistances :

- significativement supérieures à l'échéance de 1 jour dans 7 cas sur 8 (figures 4.4) ;
- majoritairement équivalentes à 7 jours et 28 jours dans 5 cas sur 8 (figures 4.4a et 4.4b) ;
- minoritairement (2 cas sur 8) mais significativement inférieures à 7 jours et 28 jours (figure 4.4c) ;
- minoritairement (1 cas sur 8) mais significativement supérieure à 7 jours et 28 jours (figure 4.4d).

Ces observations contredisent dans une certaine mesure celles habituellement constatées dans la littérature [TAP62, VER68] et confirmées par Mouret [MOU97], selon lesquelles une température de mûrissement plus élevée conduit certes à des résistances plus élevées aux jeunes âges, mais à des résistances systématiquement plus faibles dès 7 jours. Dans certains cas (BAP1 notamment), on peut soupçonner une synergie entre une maturation importante aux jeunes âges et le système (ciment, filler calcaire, superplastifiant). Néanmoins, dans d'autres cas (BAP2, BAP3), l'effet délétère de la température élevée aux très jeunes âges peut être apparent. Par conséquent, en pratique, le fait de constater des chutes de résistance lorsque la conservation des éprouvettes durant les premières 24 heures ne respecte pas la conservation normalisée propre aux éprouvettes de contrôle conduit à justifier toujours les recommandations vis-à-vis du bétonnage par temps chaud pour les BAP en matière de conservation des éprouvettes durant les premières 24 heures.

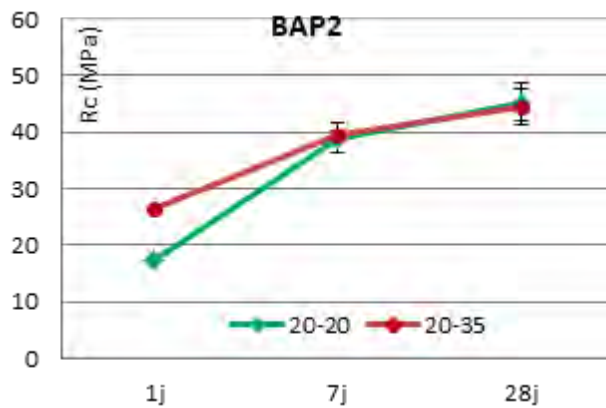


Figure 4.4a

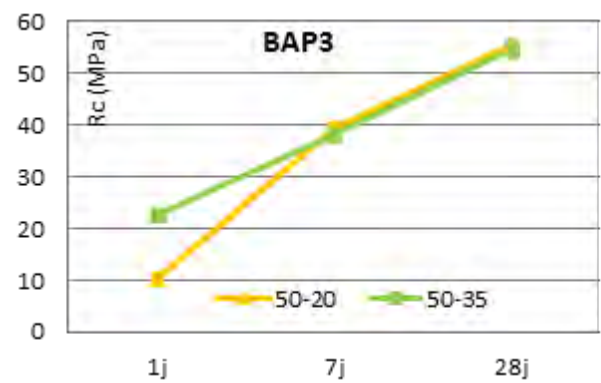


Figure 4.4b

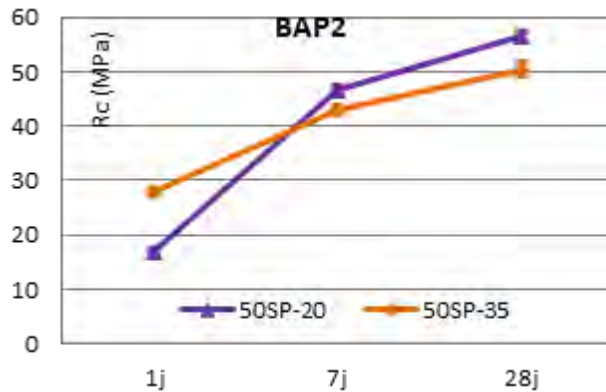


Figure 4.4c

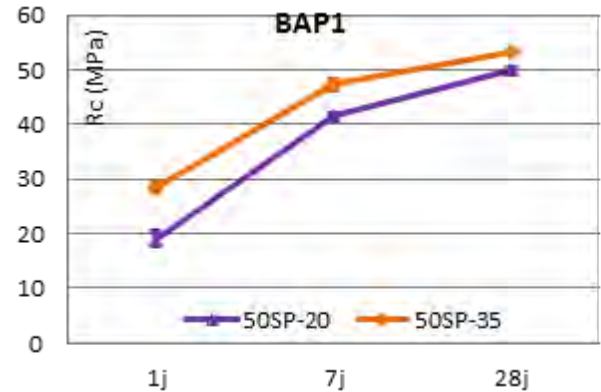


Figure 4.4d

Figure 4.4 : évolution des résistances en fonction de la conservation durant les premières 24 heures

3. MODULE SECANT A LA COMPRESSION A 28 JOURS

La procédure de mesure du module sécant est décrite au chapitre 2 (§4.1.2). L'ensemble des résultats apparaît en annexe 3.

Dans notre étude, nous analysons les résultats de manière très synthétique en fonction des paramètres déjà étudiés en ce qui concerne les résistances à la compression :

- la température initiale et les moyens de maintenir l'autoplaçance,
- le mode de conservation.

La figure 4.5 illustre les valeurs moyennes ainsi que la dispersion expérimentale (min, max) autour de la moyenne.

Pour un mode de conservation donné, il ne se dégage pas d'écart significatif lorsque la température initiale augmente, quels que soient les moyens éventuels de maintenir l'autoplaçance. De même, le mode de conservation des éprouvettes durant les premières 24 heures n'induit pas de différences significatives sur les modules d'élasticité. On retiendra simplement que les valeurs oscillent sans grande variation autour de 30 GPa.

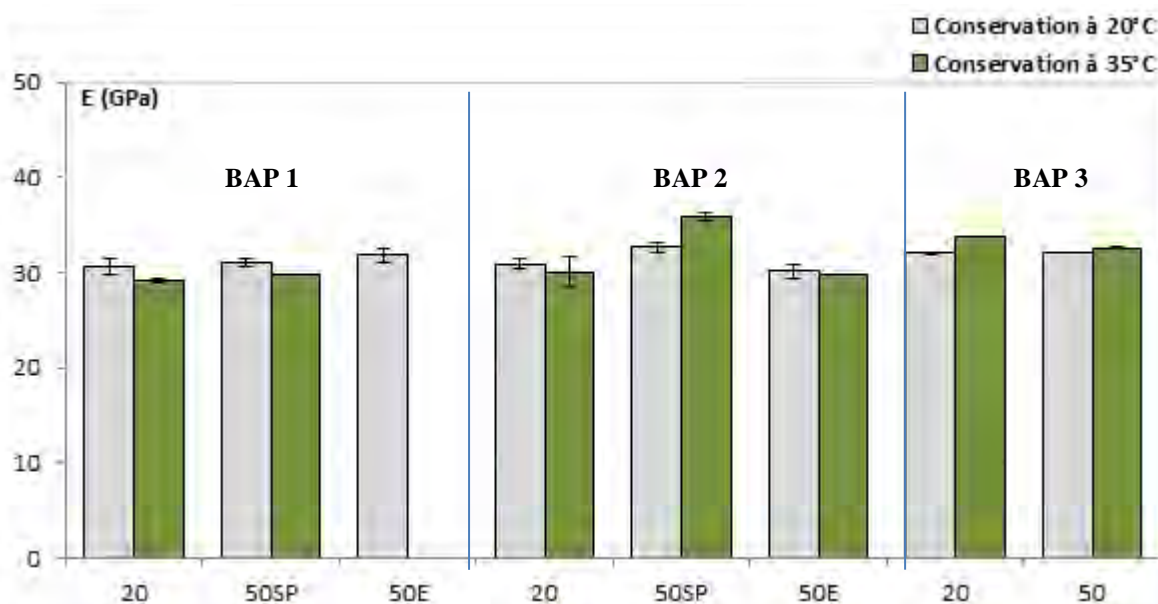


Figure 4.5 : évolution des modules d'élasticité en fonction de la température initiale du béton, des moyens pour maintenir l'ouvrabilité lorsque la température initiale est de 50°C et du mode de conservation

4. BILAN

Les résultats présentés concernant les propriétés mécaniques instantanées (résistance à la compression et module d'élasticité) nous permettent de retenir un certain nombre de points.

S'agissant de la résistance à la compression :

- l'élévation de la température initiale du béton de 20°C à 50°C favorise les performances à toutes les échéances (1j, 7j et 28j) pour BAP1 et BAP2, quels que soient les moyens de maintenir l'autoplaçance ; la même élévation de température n'induit pas de variations de résistance quelle que soit l'échéance ;
- l'élévation de la température de mûrissement durant les premières 24 heures tend classiquement à augmenter les résistances à court terme (1j) mais le plus souvent à maintenir voire augmenter les résistances à plus long terme (7j et 28j) ; c'est un fait qui, dans le même contexte expérimental, n'était pas visible sur éprouvettes de bétons traditionnels vibrés ; néanmoins dans certains cas de BAP (incorporation du CEM III notamment), l'effet délétère de la température de mûrissement élevée reste apparent et maintient la justification de veiller à conserver à 20°C les éprouvettes durant les premières 24 heures.

S'agissant du module sécant à la compression, aucune variation significative n'est mise en évidence en fonction des paramètres étudiés.

A ce stade des questions se posent.

- Comment peut-on expliquer l'amélioration des résistances mesurées sur éprouvettes de contrôle lorsque le béton est confectionné à 50°C alors qu'il n'y a pas de variations d'eau et d'air occlus avec l'élévation de la température initiale dans le cas de BAP 1 et BAP2 quels que soient les moyens de maintenir l'autoplaçance ?
- Même question dans le cas de BAP1 mûri à 35°C durant les 5 premières heures, même si les éprouvettes conservées dans ces conditions ne peuvent plus être considérées comme des éprouvettes de contrôle.
- Quelle est l'origine du maintien des résistances à 7j et 28j mesurées sur éprouvettes de contrôle dans le cas de BAP3 alors qu'il existe des variations d'eau et d'air entre les températures initiales de 20°C et 50°C ?

Le chapitre suivant propose d'apporter des éléments de réponse à ces questions en analysant les variations de résistance tout en s'affranchissant de la compacité du béton frais et de sa maturité. Des analyses thermiques sur pâtes de ciment ayant subi la même histoire de température que les bétons doivent venir compléter cette première analyse afin d'expliquer l'effet de la température élevée sur le système (ciment (CEM I ou CEM III), filler calcaire, superplastifiant).

CHAPITRE 5

Analyse des variations de résistance en fonction de la compacité du béton frais et de l'histoire des températures – pistes d'interprétation physico-chimique

1.	INTRODUCTION: PRINCIPE GENERAL DE L'ANALYSE.....	89
2.	OUTILS D'ANALYSE	90
2.1	CONCEPT DE TEMPS EQUIVALENT A 20°C : PRISE EN COMPTE DE LA MATURITE	90
2.2	RELATION DE FERET : DETERMINATION DE L'EVOLUTION DES RESISTANCES.....	90
2.2.1	<i>Courbe de référence d'évolution des résistances.....</i>	<i>91</i>
2.2.2	<i>Résistances corrigées des bétons à la compacité de référence</i>	<i>95</i>
3.	RESULTATS.....	96
3.1	QUELLE EXPRESSION DE LA COMPACITE POUR L'ANALYSE DES RESULTATS?	96
3.2	CAS DE BAP1.....	96
3.3	CAS DE BAP2.....	99
3.4	CAS DE BAP3.....	99
3.5	BILAN.....	102
4.	PISTES D'INTERPRETATION	103
4.1	ANALYSES POUR LE COMPORTEMENT DE BAP1	104
4.2	ANALYSES POUR LE COMPORTEMENT DE BAP2 ET BAP3.....	106
4.3	LES APPORTS DE LA LITTERATURE	109
4.3.1	<i>A court terme (1 jour)</i>	<i>109</i>
4.3.2	<i>A plus long terme (28 jours)</i>	<i>110</i>
4.3.3	<i>L'effet du filler calcaire.....</i>	<i>111</i>
4.4	HYPOTHESES SUR LES MODIFICATIONS DE LA MICROSTRUCTURE	111
4.4.1	<i>Le développement de l'hydratation en présence de filler.....</i>	<i>112</i>
4.4.2	<i>L'auréole de transition</i>	<i>112</i>
4.4.3	<i>L'effet de l'adjuvantation</i>	<i>113</i>
4.5	BILAN.....	114

1. INTRODUCTION: Principe général de l'analyse

Les facteurs habituellement reconnus et qui contrôlent le développement des résistances à la compression des bétons traditionnels vibrés incorporant peu ou pas d'additions minérale et chimique sont le rapport eau/ciment, le volume des vides d'air occlus, l'histoire des températures aux jeunes âges et le mode de conservation des éprouvettes jusqu'à l'échéance d'essai.

Mouret [MOU97] a montré que, pour un mode de cure donné (cure humide au-delà des premières 24 heures), il était possible d'apprécier les variations de résistance de ces bétons traditionnels vibrés en les reliant aux variations de compacité et de maturité. Pour ce faire, la relation de Féret a été utilisée afin de calculer les résistances qui auraient été mesurées sur les bétons confectionnés à des températures supérieures à 20°C s'ils présentaient la compacité des bétons de référence confectionnés à 20°C. Les résistances fictives ainsi obtenues étaient ensuite comparées, pour une formulation donnée, à une courbe de référence d'évolution des résistances en fonction du temps équivalent à 20°C. Il était donc possible d'observer si des facteurs autres que la compacité et la maturité étaient responsables des variations observées de résistance (figure 5.1).

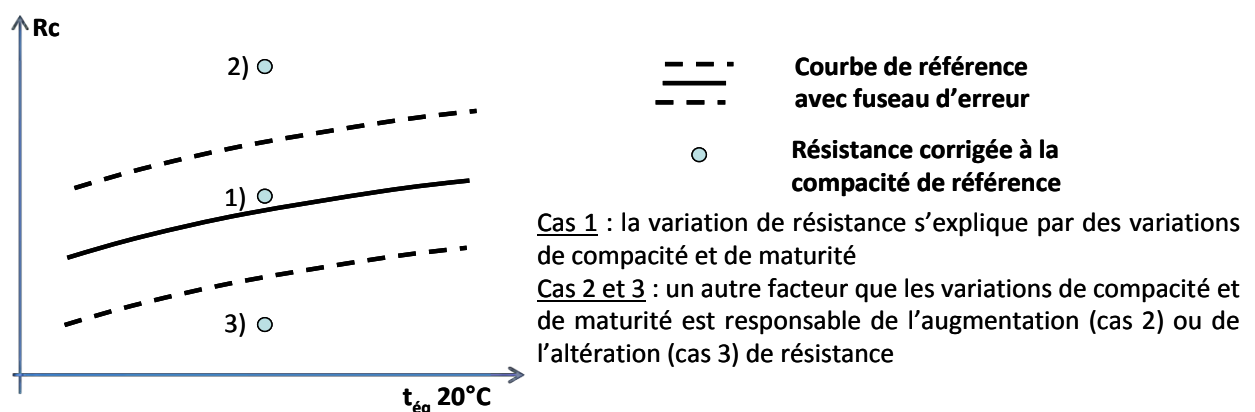


Figure 5.1 : principe de la présentation des résultats

Nous allons utiliser ce principe d'analyse afin de préciser si les variations de compacité et de maturité expliquent totalement les variations de résistance des BAP (cas 1, figure 5.1). Si d'autres facteurs interviennent (cas 2 et 3, figure 5.1), il s'agira de mieux les cerner à l'aide d'analyses thermiques.

Nous présentons d'abord comment la relation de Féret et le concept de temps équivalent sont utilisés, ensuite nous développons les résultats obtenus.

2. OUTILS D'ANALYSE

2.1 Concept de temps équivalent à 20°C : prise en compte de la maturité

La maturité à l'âge réel t d'un béton ayant subi une histoire des températures $[T(\tau)]_0^t$ peut être exprimée par un âge équivalent t_{eq} défini pour une température de référence. Le temps équivalent à 20°C $t_{eq} 20^\circ C$ est le temps que mettrait un béton donné pour atteindre la même résistance après un mûrissement isotherme à 20°C que celle obtenue après $[T(\tau)]_0^t$ (équation 5.1) :

$$Rc(20^\circ C, t_{eq}) = Rc([T(\tau)]_0^t, t) \quad E.q : 5.1$$

Le temps équivalent à 20°C peut être exprimé à partir de l'équation d'Arrhénius (équation 5.2) :

$$t_{eq} 20^\circ C = \int_0^t \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \left[\frac{1}{273 + 20} - \frac{1}{T(\tau) + 273} \right] \right\} \cdot d\tau \quad E.q : 5.2$$

Avec,

$t_{eq} 20^\circ C$ = temps équivalent correspondant à un mûrissement fictif isotherme du BAP à 20°C,

$T(\tau)$ = température du BAP à l'instant τ , connue à partir de l'histoire des températures $[T(\tau)]_0^t$,

E_a = énergie d'activation apparente du BAP (kJ/mol),

R = constante des gaz parfaits (8,314 kJ/mol/K).

Pour calculer $t_{eq} 20^\circ C$, il faut connaître E_a . Mouret [MOU97] avait fixé une valeur à 40kJ/mol devant la difficulté d'une mesure directe et en considérant les variations de E_a relevées dans la littérature (entre 30kJ/mol et 50KJ/mol). Nous avons décidé d'approcher E_a à partir de travaux plus récents dès lors que la composition en anhydres élémentaires du clinker, la surface spécifique Blaine et les fractions massiques des anhydres dans le ciment sont connues [SCH04b]. Concernant le CEM I incorporé dans BAP1 et BAP2, les calculs mènent à $E_a = 44,2\text{kJ/mol} \pm 4,0 \text{ KJ/mol}$ compte tenu de la dispersion expérimentale sur la composition du clinker. Concernant le CEM III incorporé dans BAP3, le même calcul, en considérant que CEM III = clinker + laitier, conduit à $E_a = 51,3\text{kJ/mol} \pm 4,5 \text{ KJ/mol}$. Le calcul de $t_{eq} 20^\circ C$ est mené à partir de la méthode des trapèzes avec un pas de temps 0,083h (5 minutes) qui correspond à la fréquence d'acquisition de la température dans le béton durant les premières 24 heures. Au-delà, $t_{eq} 20^\circ C$ est calculé avec un pas de 24h en considérant que la température dans les éprouvettes est constante et égale à 20°C.

2.2 Relation de Féret : détermination de l'évolution des résistances

Dans ce paragraphe, on précise le calcul des résistances de référence (§ 2.2.1) ainsi que celui des résistances à compacité de référence constante (§ 2.2.2).

2.2.1 Courbe de référence d'évolution des résistances

La relation de Féret modifiée [BAR93] est utilisée pour établir l'évolution des résistances du béton confectionné et mûri à 20°C en fonction du temps équivalent à 20°C (cf. §2.1), $R_{c\text{ réf}}(t_{\text{eq}} 20^\circ\text{C})$ (équation 5.3)

$$R_{c\text{ réf}}(t_{\text{eq}} 20^\circ\text{C}) = K \cdot R_{mc} \cdot \gamma_{\text{réf}}^{2,2} \quad \text{E.q : 5.3}$$

Avec,

$t_{\text{eq}} 20^\circ\text{C}$ = temps équivalent à 20°C,

$\gamma_{\text{réf}}$ = compacité de la pâte du béton de référence (confectionné et mûri à 20°C),

R_{mc} = résistance normale du ciment [EN 196-1] à la même échéance $t_{\text{eq}} 20^\circ\text{C}$,

K = coefficient qui dépend, entre autres, des granulats utilisés mais dont la variation est appréciée en fonction de $t_{\text{eq}} 20^\circ\text{C}$ (§ 2.2.1c).

a) Expressions de la compacité

La compacité γ de la pâte dans le béton peut être exprimée de différentes manières, soit classiquement (équation 5.4), soit en relation avec le concept de liant équivalent (équation 5.5) dans le cas des bétons incorporant un ciment CEM I (BAP 1 et BAP2).

$$\gamma = \frac{V_C + V_F + V_{sSP}}{V_C + V_F + V_{sSP} + V_{Erceff} + V_{air}} \quad \text{E.q : 5.4}$$

$$\gamma = \frac{\frac{C + kF}{\rho_c} + V_{sSP}}{\frac{C + kF}{\rho_c} + V_{sSP} + V_{Erceff} + V_{air}} \quad \text{E.q : 5.5}$$

Avec,

V_C , V_F , V_{sSP} , V_{Erceff} et V_{air} = dans un volume unité de béton, les volumes respectifs de ciment, du filler calcaire, de l'extrait sec du superplastifiant, d'eau réellement contenue efficace et d'air occlus ;

k = coefficient de prise en compte du filler calcaire dans sa contribution à la résistance (0,25 selon la norme EN 206-1 [EN206-1] puisque l'indice d'activité du filler utilisé est supérieur à 0,71) ;

ρ_c = masse volumique du ciment ;

C, F = dans un volume unité de béton, les masses respectives de ciment et de filler calcaire pour le calcul du liant équivalent $L_{eq} = C + kF$ (F étant fonction de la classe d'exposition de l'ouvrage).

En ce qui concerne le béton incorporant le CEM III, l'équation 5.5 reste valable à condition de prendre $k=0$.

Le tableau 5.1 présente les valeurs de Y_{ref} pour les différentes compositions testées. On constate que ces valeurs diffèrent en fonction de l'expression utilisée.

Tableau 5.1 : valeurs de compacité de la pâte dans le béton en fonction de l'expression utilisée dans la relation de Feret

	BAP1			BAP2			BAP3
Equation 5.4	0,453			0,432			0,472
	(F/F+C) maximum ^(*)						
	0,25	0,05	0	0,25	0,05	0	0
Equation 5.5	0,363	0,348	0,345	0,386	0,374	0,371	0,411

^(*) Valeurs maximales admises par la norme EN 206-1 en fonction de la classe d'exposition pour le filler calcaire

b) Détermination de R_{mc} correspondant au $t_{eq} 20^{\circ}C$ béton

Pour chaque formulation, nous disposons de la résistance normale du ciment R_{mc} aux échéances réelles de 2 jours et 28 jours pour les lots reçus de ciment (données fournisseur). En se donnant une loi d'évolution de R_{mc} dans le temps (équation 5.6) [DUP95], nous pouvons déduire R_{mc} à n'importe quelle échéance réelle t (en jours):

$$R_{mc}(t) = \frac{A \cdot t}{B \cdot (t - 28) + 28} \quad E.q : 5.6$$

Avec A et B , des constantes à déterminer à partir des données fournisseurs au moyen d'une régression aux moindres carrés.

Nous disposons également de l'histoire des températures mesurée sur 3 prismes de mortier, ce qui nous permet de calculer le temps équivalent à $20^{\circ}C$, selon les conditions du § 2.1, et d'obtenir l'évolution entre l'échéance réelle t et $t_{eq} 20^{\circ}C$. Ainsi, il est possible de déterminer la valeur R_{mc} qui serait obtenue pour une valeur donnée $t_{eq} 20^{\circ}C$ du béton (figure 5.2).

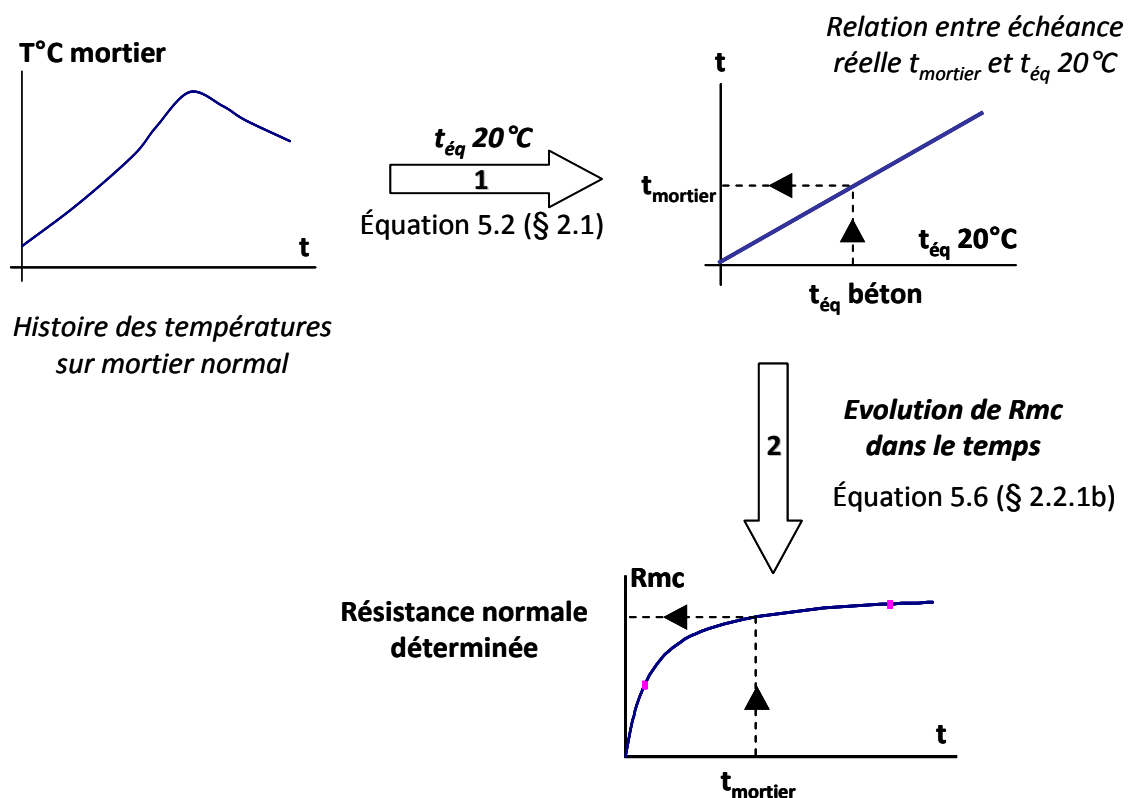


Figure 5.2: principe de détermination de la valeur de R_{mc} correspondant à une valeur $t_{eq} 20^{\circ}C$ du béton

c) Détermination du coefficient de Féret K

Pour une expression donnée de la compacité (§ 2.2.1a, équations 5.4 et 5.5), il est possible de déterminer la valeur de K à partir de l'équation 5.3 au moins à 1 jour, 7 jour et 28 jours, échéances réelles auxquelles les valeurs de $R_{c \text{ réf}}$ ont été mesurées.

Les valeurs de K diffèrent naturellement en fonction de l'expression utilisée pour calculer la compacité $Y_{réf}$ (figure 5.3 par exemple).

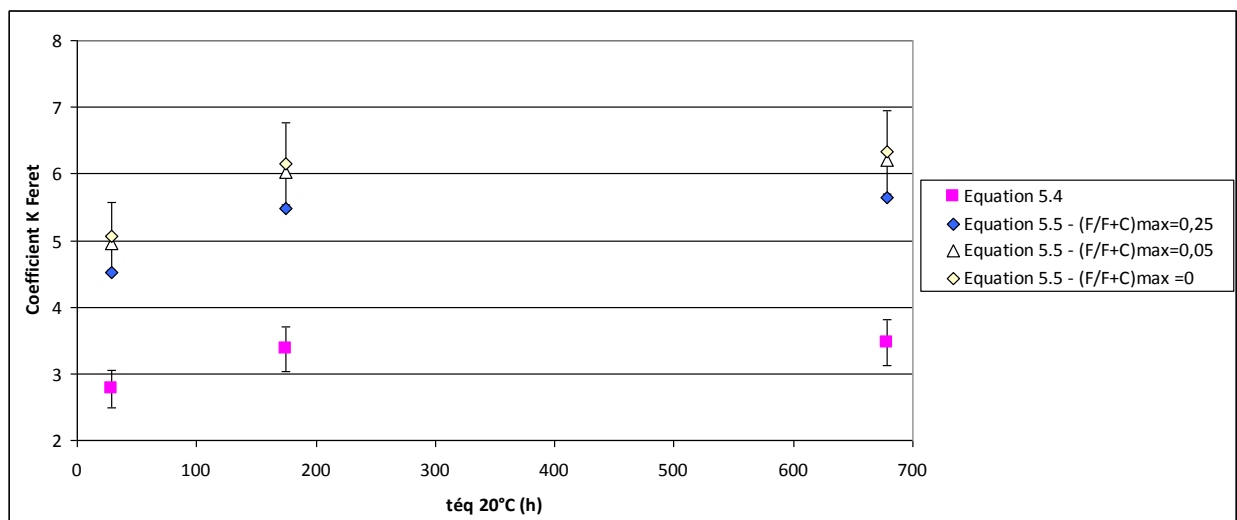


Figure 5.3 : évolution des valeurs du coefficient K en fonction de $t_{eq} 20^{\circ}C$ – BAP1

On a également porté la précision sur K pour deux cas de figure :

- compacité calculée avec l'équation 5.5 et un rapport massique maximal $(F/F+C)=0$
- compacité calculée avec l'équation 5.4.

Cette précision qui dépend de celles calculées sur les résistances du béton, du mortier et sur la compacité est aux alentours de 10% pour BAP1 et BAP2 quelle que soit les échéances d'essai sur les résistances du béton. Elle est plus variable pour BAP3, 15% à 1 jour, 6% à 7 jours et à 28 jours.

On constate typiquement pour tous les bétons, ce qui est illustré sur la figure 5.3, que :

- la variation de $(F/F+C)$ max ne conduit pas à des variations significatives de K pour une échéance donnée lorsque K est calculé avec $Y_{réf}$ exprimé par l'équation (5.5) ;
- K varie significativement lorsqu'il est calculé avec les 2 expressions de $Y_{réf}$ (équations 5.4 et 5.5).

Cette sensibilité de K en fonction de $Y_{réf}$ étant posée, elle reste néanmoins secondaire dans l'objectif de construire la courbe de référence d'évolution des résistances du béton. Le point important ici est plutôt de définir une relation entre K et $t_{eq} 20^\circ C$, même si, comme on le voit sur la figure 5.3, les variations de K ne sont pas significatives avec $t_{eq} 20^\circ C$. Les évolutions typiques observées sur la figure 5.3 (cas de BAP1 et BAP3) peuvent être approchées par une relation identique à l'équation (5.6) (équation 5.7) :

$$K(t_{eq} 20^\circ C) = \frac{A \cdot t_{eq}}{B \cdot (t_{eq} - [t_{eq} 20^\circ C]_{28j}) + [t_{eq} 20^\circ C]_{28j}} \quad E.q : 5.7$$

Avec :

A et B = constantes déterminées par régression aux moindres carrés,

t_{eq} = valeur variable du temps équivalent à $20^\circ C$,

$[t_{eq} 20^\circ C]_{28j}$ = valeur du temps équivalent à $20^\circ C$ correspondant à l'échéance réelle de 28 jours.

Concernant BAP3, une évolution linéaire est apparue suffisante.

d) Fuseau d'erreur de la courbe de référence

L'évolution des valeurs moyennes des résistances des bétons de référence ou courbe de référence peut maintenant être déterminée en fonction de $t_{eq} 20^\circ C$. Le fuseau d'erreur de la courbe de référence est défini à partir de la précision sur $R_{c\text{ réf}}(t_{eq} 20^\circ C)$ (équation 5.8) :

$$\frac{\Delta R_{c\text{ réf}}}{R_{c\text{ réf}}} = \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta R_{mc}}{R_{mc}} + 2,2 \cdot \frac{\Delta Y_{réf}}{Y_{réf}} \quad E.q : 5.8$$

Nous avons déjà discuté de la précision sur K ; la précision sur les résistances du mortier R_{mc} est liée à celle sur le temps équivalent (elle-même résultant de la dispersion sur la mesure de la température et l'erreur sur l'énergie d'activation), elle varie selon l'échéance d'essai de 2% à 4%.

Enfin, la précision sur $Y_{réf}$ dépend des erreurs sur les masses et les masses volumiques des constituants ; pour une gâchée de 50 litres, en considérant des erreurs absolues sur les masses de

ciment et de filler de $\pm 10\text{g}$, une erreur sur le superplastifiant de $\pm 1\text{g}$, les erreurs définies au chapitre 3 pour le volume d'air occlus et l'eau réellement contenue, la précision sur $Y_{\text{réf}}$ ne dépasse pas 3%. Au global le fuseau d'erreur correspond à une précision sur $R_{c \text{ réf}}$ qui varie entre 10% et 25% selon l'échéance d'essai ; la valeur la plus fréquemment rencontrée se situe autour de 15%, quelle que soit l'expression utilisée pour calculer la compacité.

2.2.2 Résistances corrigées des bétons à la compacité de référence

La courbe de référence et son fuseau d'erreur sont déterminés. Il s'agit maintenant de prendre en compte la variation de compacité du béton frais qui peut exister comme on l'a vu au chapitre 3. Pour ce faire et pour chaque composition BAP1, BAP2 ou BAP3, nous allons porter sur la courbe de référence $R_{c \text{ réf}}(t_{\text{eq}}20^\circ\text{C})$ les résistances qu'aurait atteint chaque béton confectionné et mûri à une température différente de 20°C s'il présentait la compacité du béton frais de référence. Nous rappelons qu'il sera ainsi possible d'apprécier s'il existe d'autres facteurs que la compacité et la maturité pour expliquer des variations de résistances observées lorsque les températures au malaxage et au mûrissement varient par comparaison aux conditions de référence.

a) Principe de la correction

Pour une composition donnée BAPi, soit $R_{c_j}(\gamma_j)$ la résistance à la compression mesurée à une échéance donnée du BAPij dont la compacité est γ_j . On a utilisé la relation de Féret modifiée sur la base de l'équation (5.3) pour calculer la résistance fictive qu'aurait ce même BAP si l'on ramène sa compacité γ_j à la compacité $\gamma_{\text{réf}}$ du BAP de référence, $R_{c_j}(\gamma_{\text{réf}})$. Pour ce faire, à partir du rapport $R_{c_j}(\gamma_{\text{réf}}) / R_{c_j}(\gamma_j)$, on déduit $R_{c_j}(\gamma_{\text{réf}})$ (équation 5.9) :

$$R_{c_j}(\gamma_{\text{réf}}) = \left(\frac{\gamma_{\text{réf}}}{\gamma_j} \right)^{2,2} R_{c_j}(\gamma_j) \quad \text{E.q : 5.9}$$

b) Erreurs sur les résistances corrigées

Les résistances corrigées sont affectées de deux erreurs. La première est liée aux erreurs sur les compacités et les résistances mesurées. A partir de l'équation (5.9), on peut exprimer la précision sur $R_{c_j}(\gamma_{\text{réf}})$ (équation 5.10) :

$$\frac{\Delta R_{c_j}(\gamma_{\text{réf}})}{R_{c_j}(\gamma_{\text{réf}})} = \frac{\Delta R_{c_j}(\gamma_j)}{R_{c_j}(\gamma_j)} + 2,2 \cdot \left(\frac{\Delta \gamma_{\text{réf}}}{\gamma_{\text{réf}}} + \frac{\Delta \gamma_j}{\gamma_j} \right) \quad \text{E.q : 5.10}$$

Cette précision dépend de celle sur la mesure de $R_{c_j}(\gamma_j)$ qui est au plus égale à 4,5%, de celle sur les compacités qui ne dépasse pas 3% (§ 2.2.1.d). Ainsi $\frac{\Delta R_{c_j}(\gamma_{\text{réf}})}{R_{c_j}(\gamma_{\text{réf}})}$ varie entre 11% et 15%.

La seconde erreur est liée à celle commise sur le calcul du temps équivalent (axe des abscisses) en raison des dispersions expérimentales sur la mesure de la température sur 3 éprouvettes et de

l'erreur sur l'énergie d'activation. La précision sur le temps équivalent peut aller jusqu'à 12% mais se situe dans la majorité des cas entre 2% et 5%.

3. RESULTATS

Les résistances homogénéisées à la compacité du béton de référence sont portées avec les courbes de référence en fonction du temps équivalent à 20°C sur les figures 5.4, 5.5, 5.6 et 5.7. Pour plus de lisibilité, nous portons sur trois graphes distincts les résistances à 1 jour, 7 jours et 28 jours.

3.1 Quelle expression de la compacité pour l'analyse des résultats?

La première question qui se pose est en effet de savoir si les résultats obtenus dépendent de l'expression de la compacité. Comme l'illustre typiquement la figure 5.4, la réponse est non, quelles que soient la composition, les échéances d'essai et les conditions de confection et de mûrissement. Cela était prévisible pour la courbe de référence puisque sa construction, au moyen de la relation de Férét, fait intervenir directement l'expression de la compacité dans le calcul du coefficient K (§ 2.2.1c). On constate également qu'il en est de même pour le rapport $R_{c_j}(\gamma_{ref}) / R_{c_j}(\gamma_j)$ (équation 5.9) avec un écart relatif sur $R_{c_j}(\gamma_{ref})$ qui atteint 1,7% dans un seul cas de béton et qui varie en majorité entre 0,5% et 1%. Il est donc possible de mener l'analyse quelle que soit l'expression de la compacité.

3.2 Cas de BAP1

Les résultats sont représentés sur la figure 5.5. Dans le cas de la conservation des éprouvettes à 20°C durant les premières 24 heures, on constate que l'augmentation des résistances observées au chapitre 4 dès lors que le béton est confectionné à 50°C doivent s'expliquer par d'autres facteurs que la variation de compacité (en rappel, peu significative) et de maturité puisque les résistances homogénéisées tendent à être au-dessus du fuseau d'erreur de la courbe de référence, cela quels que soient les moyens de maintenir l'autoplaçance. La position des résistances corrigées au-dessus de la courbe de référence s'accroît entre 1 jour et 28 jours. La conservation « hors normes » ne modifie pas les observations faites pour la conservation à 20°C lorsque la température initiale du béton augmente de 20°C à 50°C. Cette conservation à 35°C durant 5 heures induit en effet pour le béton de référence (20-35) une accélération des processus d'hydratation qui explique les variations de résistance puisque ce béton reste à toutes les échéances dans le fuseau d'erreur de la courbe de référence.

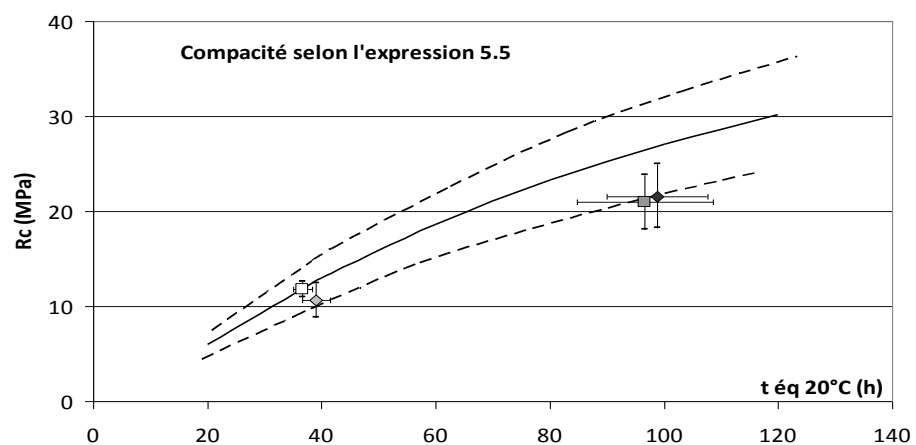
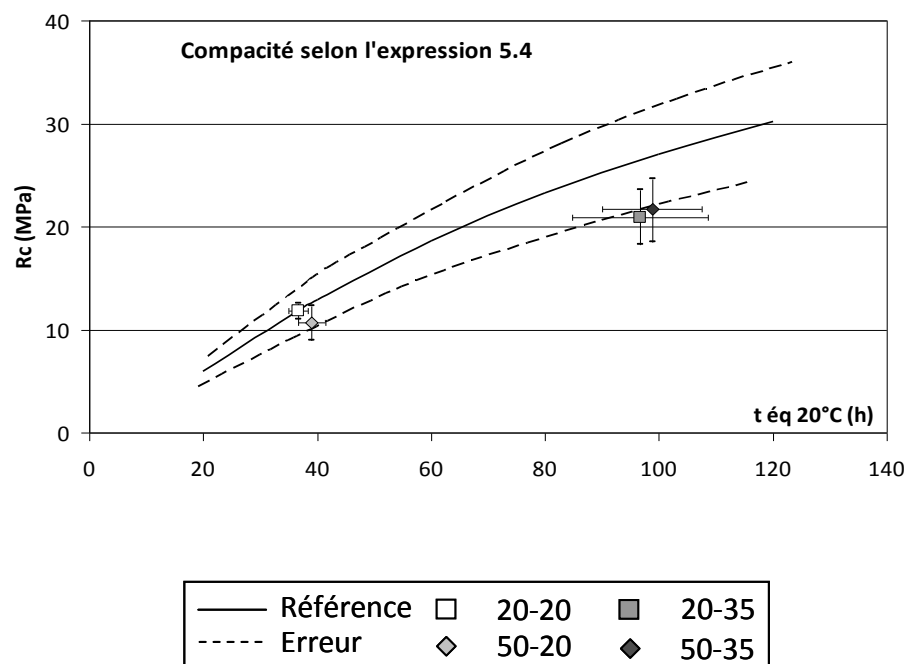


Figure 5.4 : exemple typique qui illustre une analyse indépendante de l'expression de la compacité – BAP3, échéance de 1 jour

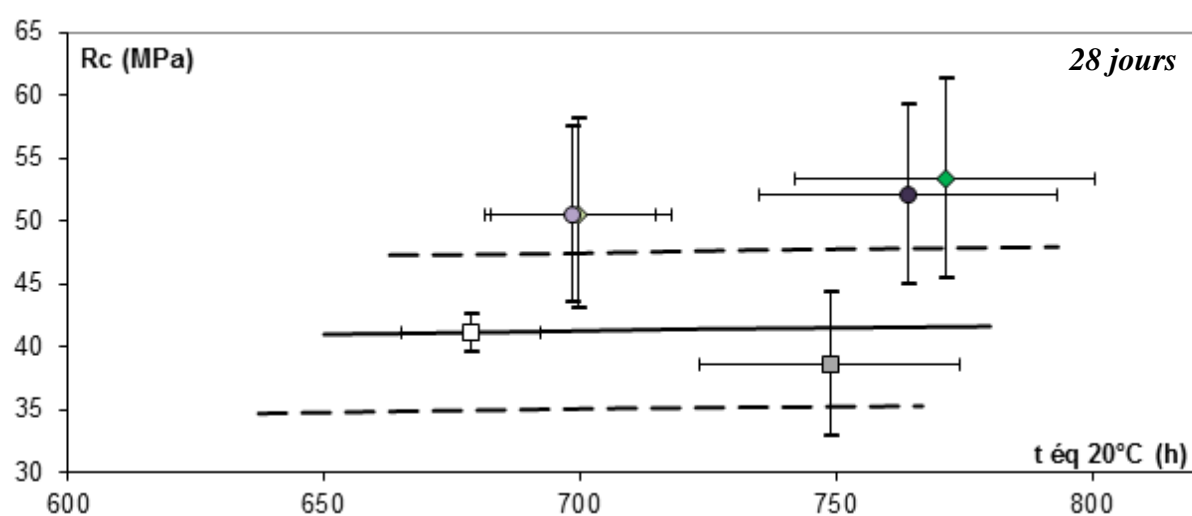
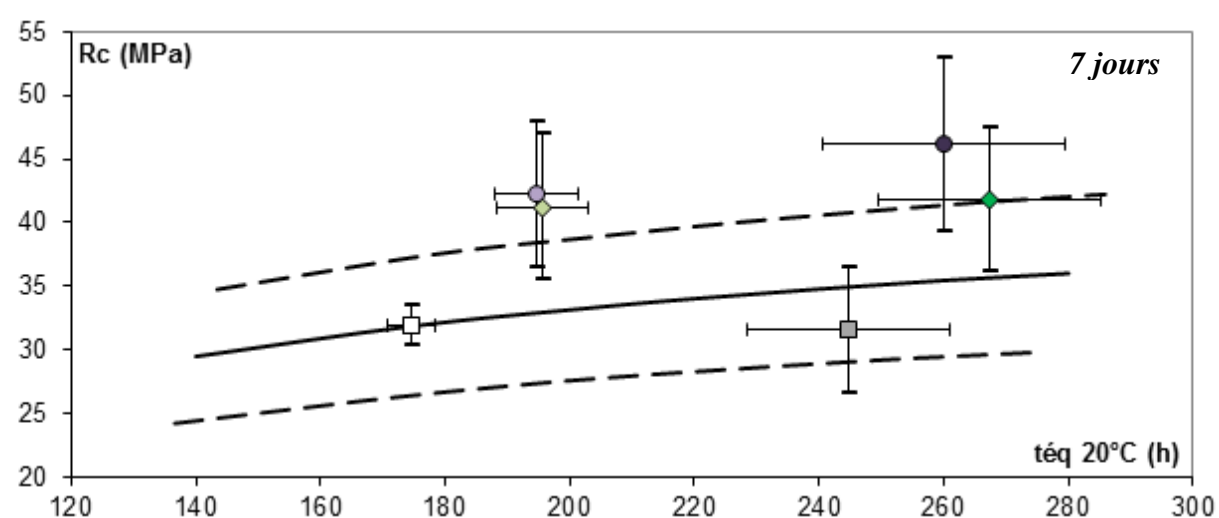
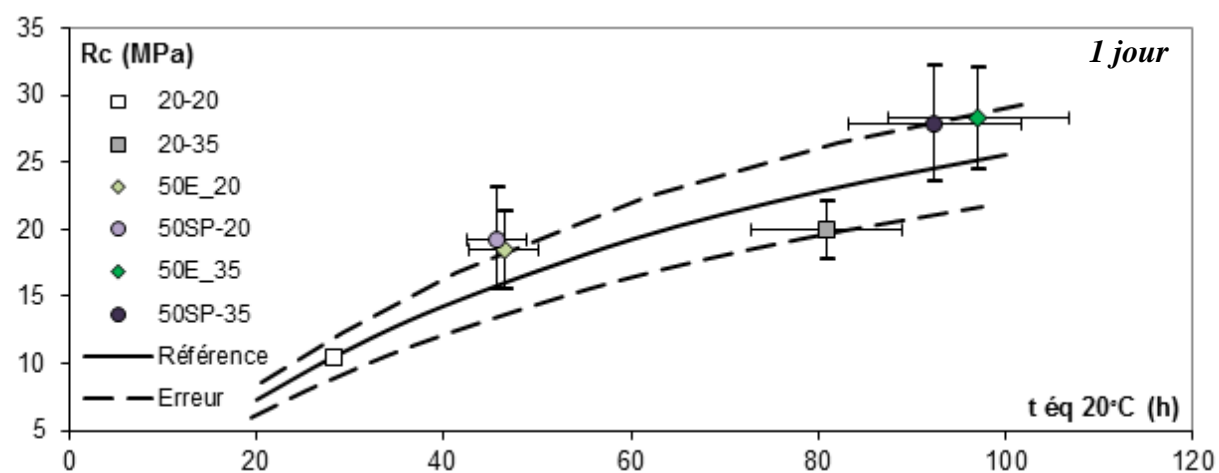


Figure 5.5 : évolution des résistances calculées à compacité de référence constante en fonction du temps équivalent à 20°C - BAP1

3.3 Cas de BAP2

La figure 5.6 regroupe les résultats relatifs à la composition BAP2. On constate dans ce cas un défaut de résistance à 1 jour lorsque l'autoplaçance est maintenue par un surdosage en superplastifiant à la température de 50°C du mélange initial (50SP-20). On peut confirmer à ce stade l'effet retard lié au superplastifiant. Cet effet n'existe plus à 7 jours et à 28 jours. On observe également que si le béton 50E-20 présente une variation de résistance à 1 jour totalement expliquée par les variations de maturité et de compacité (si faible soit elle puisque l'ajout d'eau est totalement compensé par l'évaporation), il apparaît un autre effet, d'autant plus marqué que l'échéance augmente (28 jours), qui doit expliquer l'amélioration de la résistance. Le même type d'effet existe lorsque le béton subit la température de mûrissement élevée à 35°C durant 5 heures : les résistances homogénéisées à 1 jour et qui sont légèrement voire largement en dessous de la courbe de référence sont inclus dans le fuseau d'erreur de cette courbe aux échéances de 7 jours et 28 jours. Ainsi, des désordres physiques et chimiques peuvent apparaître très tôt lorsque la température de mûrissement est élevée mais un autre effet semble contrecarrer ces désordres à plus long terme. Est-ce une synergie entre la température, le superplastifiant et le filler calcaire ? On peut y songer puisque, pour le même ciment, cette synergie apparaîtrait accentuée lorsque la quantité de filler calcaire est plus importante dans BAP1 (figure 5.5).

3.4 Cas de BAP3

La figure 5.4 (1 jour) et la figure 5.7 (7 et 28 jours) présentent les résultats concernant BAP3. On rappelle que cette composition n'a pas nécessité des ajouts d'eau ou un surdosage en superplastifiant pour maintenir l'autoplaçance à la température de 50°C. On rappelle également que cette composition a présenté des variations d'eau réellement contenue et d'air occlus entre 20°C et 50°C. Dans le cas d'une conservation à 20°C durant les premières 24 heures, aucune variation de résistance (1, 7 et 28 jours) n'apparaît entre 20°C et 50°C de température initiale ou en tout cas une variation autre que celle qui serait expliquée par des variations de compacité et de maturité. En revanche, dans le cas de la conservation à 35°C durant 5 heures, les résistances homogénéisées des bétons sont en limite inférieure ou en dessous de la courbe de référence entre 1 jour et 7 jours. Cela montre encore un effet délétère d'une maturation à température élevée qui semble s'atténuer à 28 jours puisque les résistances homogénéisées à compacité constante rentrent dans le fuseau d'erreur de la courbe de référence. Entre autres, une action hydraulique latente du laitier pourrait expliquer cette amélioration des résistances à long terme.

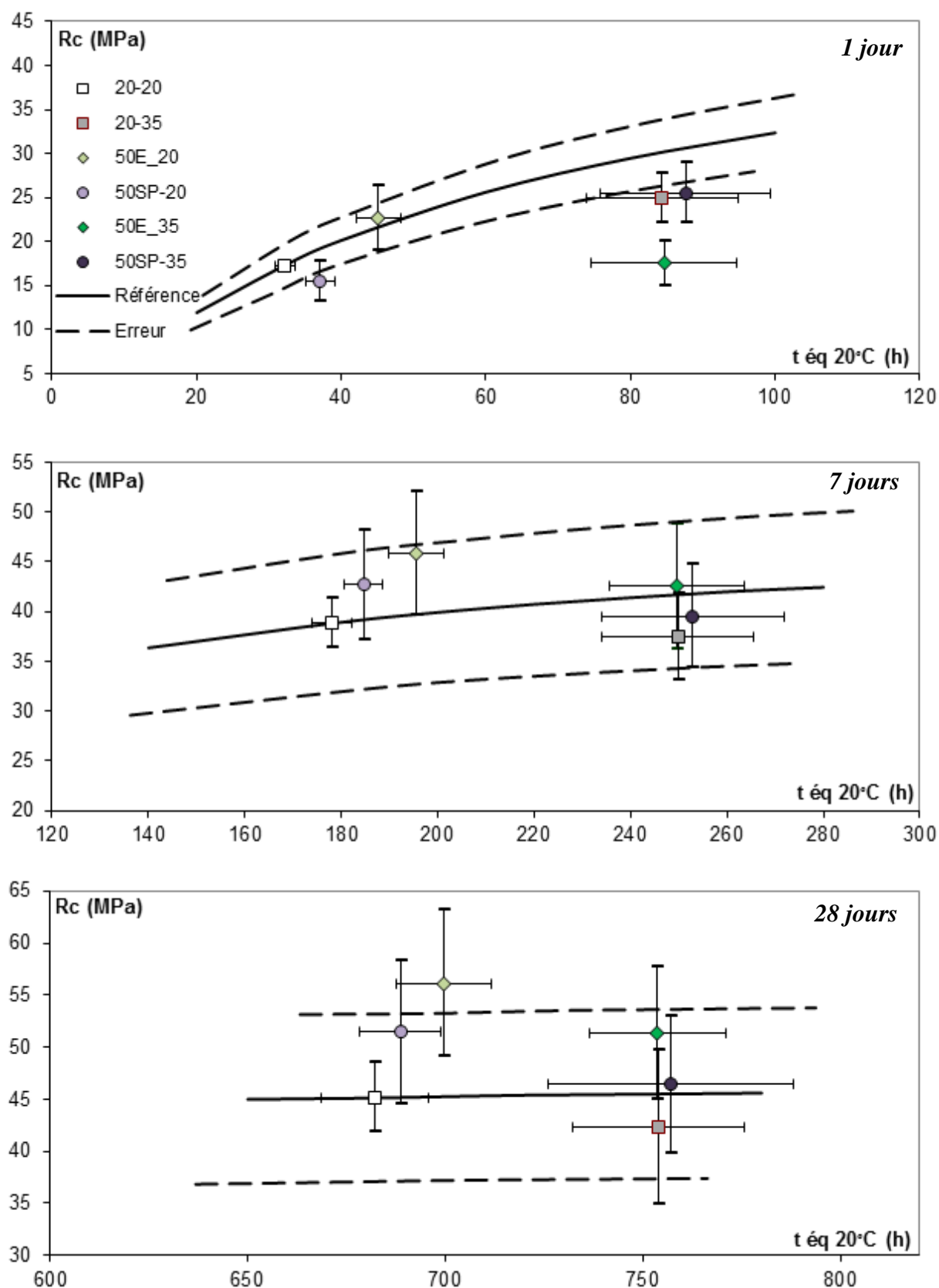


Figure 5.6 : évolution des résistances calculées à compacité de référence constante en fonction du temps équivalent à $20^\circ C$ – BAP2

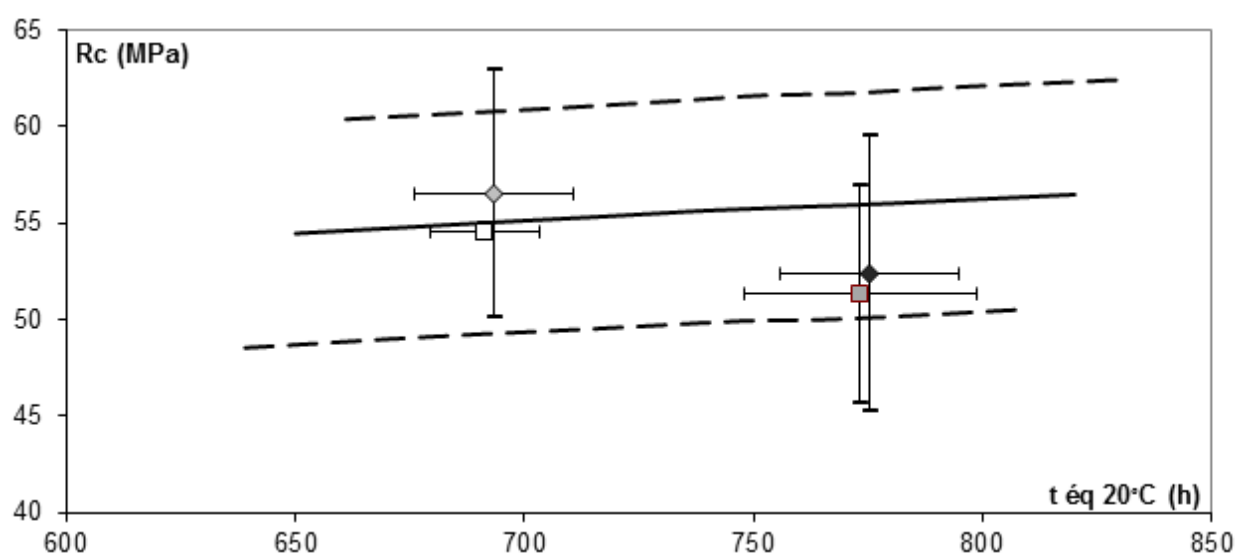
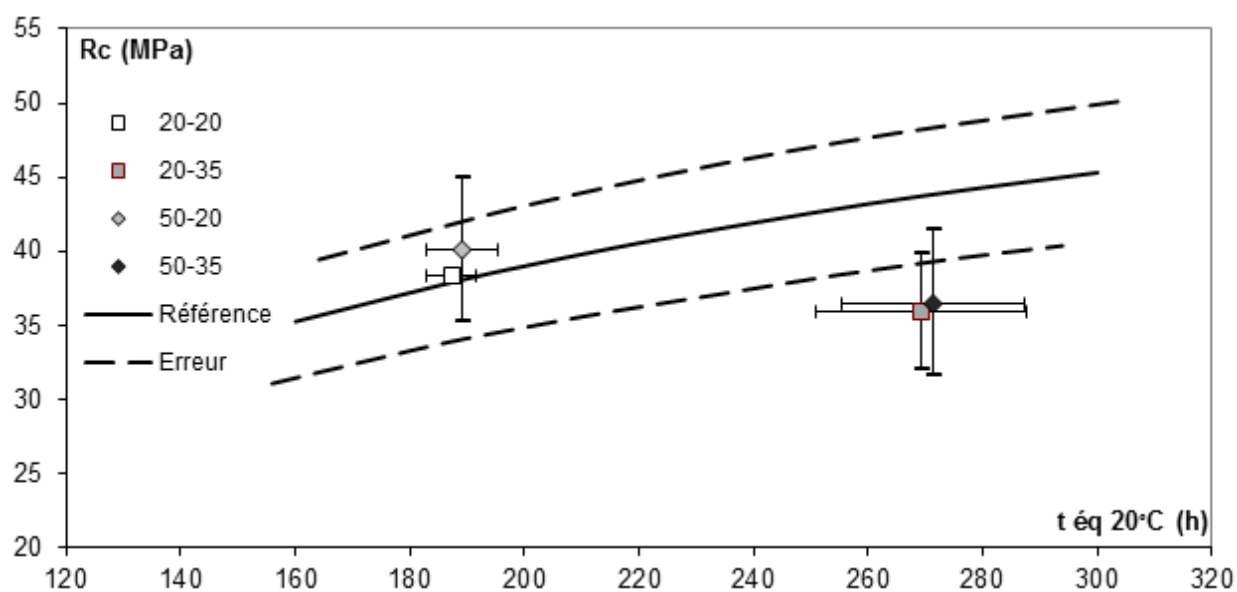


Figure 5.7 : évolution des résistances calculées à compacité de référence constante en fonction du temps équivalent à 20°C – BAP3

3.5 Bilan

La première partie de ce chapitre avait pour objectif de prendre en compte la compacité à l'état frais des bétons ainsi que leur maturité afin d'expliquer les évolutions de résistances présentées au chapitre 4. Pour ce faire, les résistances des bétons confectionnés à 50°C et mûris durant les premières 24 heures, soit à 20°C, soit en simulant une conservation de temps chaud, ont été corrigées à la compacité du béton de référence (confectionné et mûri à 20°C) au moyen de la relation de Féret. Ces résistances ont alors été comparées, pour chaque composition, à une courbe de référence d'évolution des résistances en fonction du temps équivalent à 20°C, elle-même construite à partir de la relation de Féret. Cette première analyse nous permet de mettre en exergue, sans les identifier à ce stade, des phénomènes « positifs » sur le développement des résistances, autres que les variations de compacité et de maturité, notamment dans le cas des BAP incorporant un CEM I, confectionnés à 50°C et contenant une quantité importante de filler calcaire (composition BAP1). Ces effets apparaissent moins marqués lorsque la quantité de filler diminue et la quantité de la même nature de ciment augmente (composition BAP2). Enfin, dans le cas des bétons incorporant un liant ternaire (composition BAP3) constitué du même clinker que le ciment CEM I utilisé dans BAP1 et BAP2, du même filler calcaire et d'un laitier, les résultats des résistances à compacité constant conduisent à montrer que l'effet délétère d'une température élevée durant les premiers âges sur les résistances à court terme s'estompe à long terme.

Ces phénomènes positifs mis en évidence dans les BAP n'existaient pas dans le cas des bétons traditionnels vibrés puisque Mouret [MOU97] avait montré que les variations (baisses) de résistance à 50°C étaient liées à une diminution de la compacité du béton frais, elle-même liée à des augmentations de l'eau réellement contenue et éventuellement de la quantité d'air occlus. Mouret avait également montré que les effets préjudiciables de la température de mûrissement à 35°C visibles dès l'échéance de 1 jour étaient maintenus à long terme. La principale différence entre ces 2 études tient à l'utilisation d'additions minérales (filler calcaire, laitier) et de superplastifiant dans les BAP. Il s'agit d'interpréter plus en avant dans le prochain paragraphe ces phénomènes positifs à l'aide d'analyse thermiques.

4. PISTES D'INTERPRETATION

A partir des analyses de premier niveau concernant l'impact de la température (confection/maturation) sur les résistances en compression dans le temps, on observe à l'échelle des BAP que les performances mécaniques au jeune âge sont améliorées tandis que celles à plus long terme sont maintenues (cf.Chap.4). Cette tendance se vérifie pour les bétons confectionnés avec une matrice binaire (BAP1 et BAP2) mais aussi pour le béton possédant une matrice ternaire à base de laitier (BAP3). Comparativement aux bétons vibrés possédant un volume de pâte plus faible et une phase liante plus basique (ciment + eau), les résultats au jeune âge sont similaires avec une amélioration [ALE72] tandis qu'à 28 jours, on observe un comportement différent. Pour les BAP, les résistances mécaniques ne semblent pas affectées par la température alors que pour les BV, des baisses de performance sont observables [MOU97].

Il est clair qu'à l'échelle de l'analyse de premier niveau, les bétons autoplaçants présentent le même comportement aussi bien à 1 qu'à 28 jours avec l'élévation de la température. Mais en ramenant les résultats de résistances présentées dans le chapitre 4 à compacité constante et en prenant en compte la maturité (Chap.5, §3), une analyse plus approfondie peut être faite sur l'impact de la température sur les propriétés mécaniques.

Avec ce filtre, des comportements dans le temps relativement différents selon le béton étudié apparaissent, mettant en évidence des désordres ou des améliorations notables. En effet, suite au développement du paragraphe précédent, il est montré que trois cas de figure sont envisageables (Figure 5.8) :

- les points sont situés dans le fuseau de référence ; la variation de résistance s'explique par des variations de compacité et de maturité ;
- les points sont positionnés au dessus du fuseau ; d'autres facteurs que la variation de compacité et de maturité sont responsables de l'augmentation de résistance ;
- les points sont positionnés au dessous du fuseau ; d'autres facteurs sont responsables de l'altération de la résistance.

En observant l'ensemble des figures 5.5 à 5.7, deux tendances semblent se démarquer :

Pour le BAP1 (figure 5.8a, §4.1), béton faiblement dosé en ciment ($C=292\text{kg/m}^3$) mais fortement fillérisé ($F/C=0,5$),

Pour les BAP2 et BAP3 (figure 5.8b, §4.2.), bétons avec une teneur en ciment plus importante (350 et 370kg/m^3 respectivement).

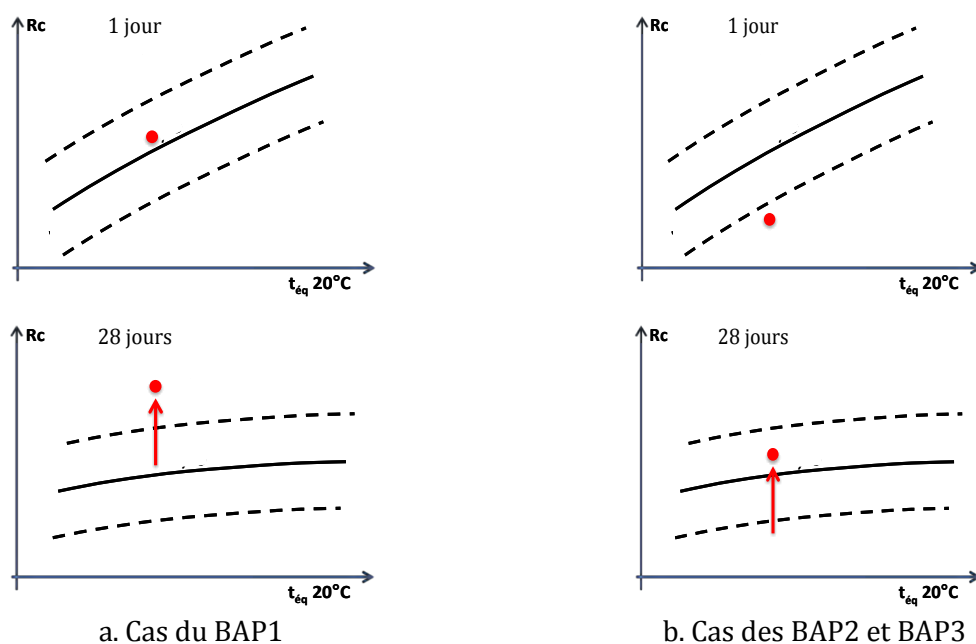


Figure 5.8 : comportements observables des variations de R_c avec prise en compte de la compacité et de la maturité entre 1 et 28 jours

A partir de ces analyses de second niveau, on peut identifier des bétons dont la seule variation de la compacité ne permet pas d'expliquer les évolutions de résistances en compression avec l'élévation des températures. Il s'agit des mélanges dont les points sont positionnés à l'extérieur du fuseau d'erreur de la courbe de référence. Nos investigations nous mènent donc à essayer de chercher des explications à l'échelle des produits d'hydratation des matrices cimentaires, grâce à des analyses thermiques. Pour cela, des pâtes de ciment issues de la phase liante du béton considéré (ciment + filler + superplastifiant + eau) ont été coulées et ont été mûries dans les mêmes conditions que les bétons (cf. Chap.2, §2.2). Seules les solutions de maintien de rhéologie n'ont pas été prises en compte dans cette partie de l'étude, compte tenu des faibles variations de maturité entre 50E et 50SP, notamment à la maturation de 35°C. L'ensemble des résultats des analyses thermiques (courbes $TG(\%)=f(T^{\circ}C)$, $dTG\%/dt=f(T^{\circ}C)$) obtenus sur les pâtes de ciment et les exploitations quantitatives associées sont consignées en annexe 9.

4.1 Analyses pour le comportement de BAP1

Pour le BAP1 confectionné avec une matrice binaire (clinker + filler calcaire) fortement fillérisée ($F/C=0,5$), il apparaît que les mélanges confectionnés à température élevée (BAP1 50-X) doivent être étudiés sur des critères d'hydratation. Si l'on s'intéresse aux performances entre 1 et 28 jours, une nette amélioration entre ces deux échéances est avérée. Au jeune âge, l'analyse de second niveau fait apparaître que la température n'affecte pas les performances mécaniques ; les points sont positionnés dans le fuseau de référence. Tandis qu'à 28 jours, les performances semblent évoluer positivement car les points se sont déplacés au-dessus du fuseau de référence traduisant une

amélioration de la résistance avec l'élévation de température. Le Tableau 5.2 présente les exploitations d'analyses thermiques réalisées sur pâtes de ciment associées aux bétons BAP1. Les résultats sont traités à 1 et 28 jours d'hydratation.

Tableau 5.2 : maturités et résistances des bétons BAP1- exploitations quantitatives des analyses thermiques pour pâtes de BAP1 de 1 à 28 jours

Bétons	t _{eq} 20°C (h)	R _c réf /R _c (*) à même t _{eq}	Pâtes	nCa(OH) ₂ ¹	nCaCO ₃ ¹	% d'eau liée chimiquement ²	qCSH+ CAH ³
<u>1 jour</u>							
BAP1 20-20	28,3	10,5/10,5	P-BAP1 20-20	2,51	29,36	4,65	35,5
BAP1 50E-20	46,4	15,9/18,5	P-BAP1 50-20	3,86	30,18	6,49	44,9
BAP1 50SP-20	45,6	15,7/19,3					
BAP1 50E-35	97,1	25,2/28,3	P-BAP1 50-35	4,93	29,25	8,90	64,5
BAP1 50SP-35	92,4	24,5/27,9					
BAP1 20-35	80,9	23,0/19,9	P-BAP1 20-35	3,99	29,27	7,29	40,4
<u>28 jours</u>							
BAP1 20-20	678,5	41,1/41,1	P-BAP1 20-20	5,18	26,86	10,61	64,1
BAP1 50E-20	699,7	41,3/50,6	P-BAP1 50-20	3,74	26,07	10,77	68,1
BAP1 50SP-20	698,6	41,3/50,5					
BAP1 50E-35	771,3	41,6/53,4	P-BAP1 50-35	5,76	27,64	10,38	67,5
BAP1 50SP-35	764,0	41,6/52,1					
BAP1 20-35	748,7	41,5/38,6	P-BAP1 20-35	5,51	27,66	12,04	71,4

(*) Résistance corrigée à la compacité du béton de référence pour un béton confectionné et/ou mûri en température.

Tout d'abord, sur l'ensemble des matériaux, on constate que les quantités molaires de carbonate de calcium restent très proches (entre 27,7 et 30,1mol/100gr de matériau) ce qui nous permet de valider nos résultats.

A court terme (1 jour), et comparativement au matériau de référence (20-20), les quantités d'eau chimiquement liée et de Portlandite sont d'autant plus élevées que la maturité est plus importante. Il semble en être de même pour la quantité d'hydrates assimilés à des C-S-H et à des C-A-H, excepté BAP1 20-35 pour lequel un déficit de performances tend à exister. L'évolution de ces paramètres peut alors expliquer dans une certaine mesure l'évolution des résistances mécaniques dès le jeune âge. A plus long terme (28 jours), on constate que la quantité d'eau liée et les quantités d'hydrates (C-S-H et C-A-H) restent au moins équivalentes à celles mesurées sur la référence. On peut donc conclure que l'effet néfaste de la température élevée sur l'hydratation à plus long terme et observé sur les bétons vibrés selon la théorie de Verbeck et Helmuth [VER68] (chapitre 1, §2.2.4a) semble moins, voire ne semble pas se manifester pour les bétons autoplaçants gâchés avec une matrice fortement fillérisée.

A ce stade, un autre paramètre doit être analysé : la cinétique d'hydratation entre 1 et 28 jours, que l'on caractérise par un taux d'avancement de l'hydratation basé sur un rapport quantitatif entre 1

¹ Quantité molaire de Ca(OH)₂ et de CaCO₃ pour 100g de pâte de ciment.

² Perte de masse due à la perte d'eau chimiquement liée entre 105°C et 450°C (CH non comprise).

³ Quantité relative d'hydrates décomposés entre 105°C et 350°C (C-S-H et C-A-H).

jour et 28 jours. Le tableau 5.3 présente ce rapport pour la Portlandite, la teneur en eau chimiquement liée et la quantité d'hydrates résistants.

Tableau 5.3 : avancement des caractéristiques d'hydratation entre 1 et 28 jours pour BAP1 selon ...

	... la formation de CH	... la quantité d'eau chimiquement liée	... la quantité d'hydrate (C-S-H et C-A-H)
P-BAP1 20-20	48,5%	43,8%	55,4%
P-BAP1 50-20	103,2%	60,2%	65,9%
P-BAP1 50-35	85,6%	85,7%	95,6%
P-BAP1 20-35	72,4%	60,5%	56,6%

Comparativement à la pâte de référence où la quantité d'eau chimiquement liée est peu développée à 1 jour par rapport à 28 jours (43,8%), la température semble accélérer le développement de l'hydratation dès 1 jour (de 60,3% à 85,7%). Les mêmes tendances sont observées pour les autres caractéristiques. On peut en déduire à ce stade que, comme pour les bétons vibrés, la cinétique de l'hydratation se ralentit dans le temps lorsque les températures de confection et de mûrissement sont élevées. Or, pour les bétons vibrés, ce ralentissement des processus d'hydratation (diffusion notamment) conduit à une mauvaise répartition des hydrates et à une plus faible résistance à long terme. Dans le cas d'un BAP fortement fillérisé, l'augmentation de la résistance à maturité équivalente à un mûrissement dans les conditions 20-20 à l'échéance réelle de 28 jours est certainement liée à des processus physico-chimiques initiaux, liés à la présence du filler et du superplastifiant, et qui sont favorables au développement de la résistance. Nous émettons des hypothèses au § 4.4, avec l'aide de la littérature (§ 4.3).

4.2 Analyses pour le comportement de BAP2 et BAP3

Pour le BAP2 et le BAP3 confectionnés avec des matrices plus actives, l'étude de second niveau a mis en évidence des comportements différents à BAP1. Les matrices sont considérées comme plus actives que celle de BAP1 ; pour le BAP2, la matrice possède une forte teneur en ciment CEMI $C=350\text{kg/m}^3$ et est plus faiblement fillérisée ($F/C=0,25$). Pour BAP3, il s'agit d'une matrice ternaire avec une forte teneur en ciment composé $C=370\text{kg/m}^3$ et incorporant du laitier (40% de C). Au jeune âge (1 jour) et avec des températures élevées, les résultats des figures 5.6 et 5.7 (§3) montrent que les points sont positionnés au dessous du fuseau de référence. Cette localisation traduit un déficit de performance mécanique résultant de désordres au niveau de la microstructure. Dans le temps (28 jours), il semblerait que ce déficit de performances s'atténue car les points se déplacent dans le fuseau.

De la même manière que pour BAP1, les résultats d'analyses thermiques sur pâtes de ciment vont permettre d'expliquer les variations de résistance de BAP2 et BAP3 (matrices chimiquement plus actives) liées aux élévations de la température et que les variations de compacité et de maturité

n'ont pas pu faire. Les tableaux 5.4 et 5.5 présentent les exploitations correspondantes entre 1 et 28 jours d'hydratation.

Tableau 5.4 : maturités et résistances des bétons BAP2- exploitations quantitatives des analyses thermiques pour pâtes de BAP2 de 1 à 28 jours

Bétons	t _{eq} 20°C (h)	R _{c réf} /R _c (*) à même t _{eq}	Pâtes	nCa(OH) ₂	nCaCO ₃	% d'eau liée chimiquement	qCSH+ CAH
			1 jour				
BAP2 20-20	32,2	17,3/17,3	P-BAP2 20-20	3,58	19,41	5,02	47,1
BAP2 50E-20	45,1	21,6/22,7	P-BAP2 50-20	4,23	18,77	7,60	47,3
BAP2 50SP-20	37,1	19,1/15,4					
BAP2 50E-35	84,7	30,2/17,5	P-BAP2 50-35	5,39	18,20	9,14	51,9
BAP2 50SP-35	87,6	30,6/25,6					
BAP2 20-35	84,4	30,1/25,0	P-BAP2 20-35	4,97	17,30	9,50	55,1
			28 jours				
BAP2 20-20	682,1	45,2/45,2	P-BAP2 20-20	5,14	17,27	11,88	63,9
BAP2 50E-20	699,6	45,3/56,1	P-BAP2 50-20	6,29	15,84	12,14	70,2
BAP2 50SP-20	688,6	45,2/51,5					
BAP2 50E-35	753,7	45,5/51,3	P-BAP2 50-35	5,92	15,57	12,99	70,3
BAP2 50SP-35	756,9	45,5/46,4					
BAP2 20-35	753,9	45,5/42,3	P-BAP2 20-35	5,71	17,11	10,72	55,7

(*) Résistance corrigée à la compacité du béton de référence pour un béton confectionné et/ou mûri en température.

Tableau 5.5 : maturités et résistances des bétons BAP3- exploitations quantitatives des analyses thermiques pour pâtes de BAP3 de 1 à 28 jours

Bétons	t _{eq} 20°C (h)	R _{c réf} /R _c (*) à même t _{eq}	Pâtes	nCa(OH) ₂	nCaCO ₃	% d'eau liée chimiquement	qCSH+ CAH
			1 jour				
BAP3 20-20	36,7	11,8/11,8	P-BAP3 20-20	3,74	17,07	5,57	38,0
BAP3 50-20	39,0	12,6/10,7	P-BAP3 50-20	3,82	16,91	5,56	37,9
BAP3 50-35	98,8	26,8/21,7	P-BAP3 50-35	3,78	18,59	7,56	40,6
BAP3 20-35	96,7	26,4/20,9	P-BAP3 20-35	3,25	16,16	8,23	46,3
			28 jours				
BAP3 20-20	691,3	54,6/54,6	P-BAP3 20-20	3,12	15,89	10,26	53,2
BAP3 50-20	693,2	55,1/56,5	P-BAP3 50-20	3,62	16,70	10,63	57,8
BAP3 50-35	775,2	56,0/52,4	P-BAP3 50-35	2,01	17,00	9,45	55,7
BAP3 20-35	773,3	56,0/51,3	P-BAP3 20-35	3,21	17,80	11,02	59,3

(*) Résistance corrigée à la compacité du béton de référence pour un béton confectionné et/ou mûri en température.

Malgré la nature très différente des phases liantes, les analyses présentent des similitudes à court terme (1 jour). Comparativement aux matériaux de référence (20-20), il semble que l'élévation de la température de confection (50°C) ait peu d'effet sur la quantité d'hydrates et la quantité d'eau chimiquement liée. Mais, pour une température de maturation de 35°C et indépendamment de la température de confection (20°C ou 50°C), on observe une hausse des caractéristiques d'hydratation (quantité d'hydrates et d'eau liée). Cette constatation nous laisse penser qu'au jeune âge les matrices plus actives semblent plus sensibles à la température de maturation. En apparence, pour le praticien, les résultats sont intéressants car les niveaux de résistance sont augmentés avec la température. Mais dans le référentiel prenant en compte la compacité et la maturité, les niveaux de résistances n'atteignent pas ceux qui seraient obtenus à maturité équivalente dans les conditions 20-20. Il nous manque ici les caractéristiques de l'hydratation qui correspondraient à la même maturité

mais qui seraient obtenues dans les conditions 20-20 pour conclure clairement à l'existence d'un désordre.

En revenant dans la stricte comparaison entre mélanges, dans le cas de BAP3, l'hydratation latente du laitier (lente en condition normale) semble avoir été accélérée par thermoactivation grâce à l'élévation de la température de mûrissement. La diminution de la teneur en Portlandite pour ce mélange confirme bien qu'il y a eu une modification de l'hydratation du laitier.

A plus long terme (28 jours), les similitudes remarquées à 1 jour quelle que soit la nature du béton n'existent plus. A cette échéance, les évolutions des deux matériaux sont à dissocier.

BAP2. Avec cette matrice binaire, une confection à 50°C, quelle que soit la température de maturation (P-BAP2 50-X), favorise l'hydratation en quantité comparativement aux conditions normales (P-BAP2 20-20). Par ailleurs, une confection à 20°C et une cure de 5 heures à 35°C, présente un effet néfaste sur l'hydratation avec une diminution des caractéristiques étudiées de l'hydratation. Cette baisse de performance rappelle celle obtenue sur béton vibré [ALE72, MOU97, JAL94]. Mais, contrairement aux bétons vibrés, les désordres qui existaient à court terme et qui persistaient à long terme, paraissent ici en partie contrecarrés quand on compare, à maturité équivalente, la résistance obtenue à celle de référence (tableau 5.4).

BAP3. Dans le temps (28 jours), les caractéristiques d'hydratation des matériaux soumis à une élévation de température sont équivalentes ou améliorées par rapport au matériau de référence (20-20). Ces modifications sont en contradiction avec les performances mécaniques qui, à compacité identiques, sont en moyenne comparables ou inférieures à la référence. Il est possible que les hydrates formés par l'hydratation du laitier (nature des hydrates modifiée, causée par une évolution de cinétique) soient moins résistants quand ils sont formés à température plus élevée [CAS09].

Il faut aussi remarquer que pour P-BAP3 50-35, l'hydratation du laitier est bien confirmée car il y a une nette diminution de la teneur en CH. A ce stade de l'étude, il est encore difficile de conclure sur ces modifications complexes de l'hydratation de matrice ternaire. En effet, nous ne sommes pas en mesure de dissocier de manière claire les phases hydratées issues du ciment et du laitier.

Les tableaux 5.6. et 5.7. présentent l'avancement de l'hydratation entre 1 et 28 jours, pour BAP2 et BAP3, respectivement.

Tableau 5.6 : avancement des caractéristiques d'hydratation entre 1 et 28 jours pour BAP2 selon ...

	... la formation de CH	... la quantité d'eau chimiquement liée	... la quantité d'hydrate (C-S-H et C-A-H)
P-BAP2 20-20	69,6%	42,3%	73,7%
P-BAP2 50-20	67,2%	62,6%	67,3%
P-BAP2 50-35	91,0%	70,4%	73,8%
P-BAP2 20-35	87,0%	88,6%	98,9%

Pour BAP2, l'avancement du taux d'hydratation relatif à l'eau liée est accéléré significativement avec l'élévation de température (toujours largement supérieur à 42,3% valeur pour P-BAP2 20-20). Le développement des quantités de C-S-H et de C-A-H semble se ralentir de la même manière que la référence mais c'est P-BAP2 20-35 qui présente le plus fort ralentissement puisqu'à 1 jour on a atteint pratiquement la quantité mesurée à 28 jours. On peut voir là l'existence privilégiée des réactions de nature topochimique aux jeunes âges, ce qui peut ralentir la diffusion des espèces et provoquer une moindre homogénéité de la répartition des hydrates à long terme, selon la théorie de Verbeck et Helmuth [VER68]. Nous répétons que cette théorie est vraisemblablement contrebalancée par d'autres effets dans la mesure où le défaut de résistance à long terme est peu ou pas apparent dans le cas BAP2.

Pour BAP3, la température de mûrissement de 35°C (P-BAP3 X-35) favorise l'avancement de l'hydratation entre le jeune âge et le long terme, au moins pour la quantité d'eau liée. Car l'avancement des quantités de C-S-H et C-A-H n'apparaît pas significativement modifié avec les conditions de maturation, tandis que la consommation de Portlandite dans les conditions de maturation les plus défavorables au sens du temps chaud (50-35) est très significative (tableau 5.7). Il y a dans ce cas un effet important de la présence du laitier sur la microstructure qui contrecarre les désordres de résistance à long terme.

Tableau 5.7 : avancement des caractéristiques d'hydratation entre 1 et 28 jours pour BAP3 selon ...

	... la formation de CH	... la quantité d'eau chimiquement liée	... la quantité d'hydrate (C-S-H et C-A-H)
P-BAP3 20-20	119,9%	54,3%	71,4%
P-BAP3 50-20	105,5%	52,3%	65,6%
P-BAP3 50-35	188,1%	80,0%	72,9%
P-BAP3 20-35	101,2%	74,7%	78,1%

4.3 Les apports de la littérature

Nous rappelons ici les interprétations relevées dans la littérature et qui ont été réalisées pour des bétons vibrés, nous les avons déjà évoquées tout au long des paragraphes 4.1 et 4.2. Elles pourront par la suite orienter les hypothèses émises dans le paragraphe 4.4 dans le cas des bétons autoplacants qui sont des matériaux avec un volume de pâte beaucoup plus important et qui sont très fillérisés.

4.3.1 A court terme (1 jour)

De nombreuses études traitant de l'élévation de la température au premier stade de l'hydratation ont été réalisées à l'échelle du béton. Il apparaît que pour des matrices conventionnelles (ciment, filler, eau), les auteurs sont relativement unanimes au jeune âge. L'élévation de température des produits à

base cimentaire favorise le développement des performances mécaniques au jeune âge [NUR64, PIH72, KLI54]. Ce phénomène s'explique par une mise en solution des ions, favorisée par la hausse de température du système, ce qui va entraîner une réduction de la période dormante et donc engendrer une thermoactivation de la réaction d'hydratation du ciment.

4.3.2 A plus long terme (28 jours)

En revanche, à plus long terme, il semblerait que les résultats obtenus dans le cadre de cette étude aillent à l'encontre de ceux trouvés dans la littérature. Selon la bibliographie, une hausse de température lors du premier âge d'un béton courant provoque une baisse de performances mécaniques à long terme. Elle est imputable à des causes physico-chimiques ou chimiques [ALE72].

Selon la théorie de [VER68], la cause proviendrait d'une répartition non uniforme des hydrates. Comparativement à une hydratation à 20°C (Figure 5.9.a. illustration selon [KJE87]), cette modification de la distribution des hydrates entraîne une hétérogénéité de la structure (Figure 5.9.b.). Avec l'accélération de l'hydratation par la température, la diffusion n'est pas possible à une certaine distance des anhydres à cause d'une faible diffusivité des espèces dissoutes et à la faible solubilité des hydrates formés. Au final, un noyau anhydre sera entouré d'une «coquille d'hydrates» très dense. Ce mode de développement de l'hydratation va avoir une influence sur le ralentissement de l'hydratation ainsi que sur la réduction des résistances à même degré d'hydratation.

Chimiquement, il y a une perturbation de la stabilité du système, entraînant un déplacement de l'équilibre chimique entre la quantité d'anhydres et d'hydrates formés. Ce phénomène génère une limitation de la formation d'hydrates expliquant partiellement la baisse des performances [JAL95]. D'autre part, même si les produits formés par l'hydratation à 20°C (C-S-H, Portlandite et aluminates hydratés) sont identiques à ceux formés lors d'une élévation de température, certaines caractéristiques de l'hydratation sont modifiées. Les C-S-H évoluent avec une croissance du degré de polymérisation des chaînes silicatées [BEN91]. On observe une augmentation du rapport entre les chaînes polymères et le dimère de tétraèdre SiO_4 [MAS94], une densification de la couche d'hydrates entourant les grains anhydres [SCR92], une diminution de leur microporosité interne (lorsque les hydrates sont formés dans le grain anhydre) [KJE96], une modification morphologique des C-S-H externes passant d'une structure à fibres courtes et enchevêtrées à 20°C à une structure à fibres longues et dissociées. Concernant la Portlandite, elle se forme en amas plus denses et en plus grande quantité avec des températures plus élevées que lors d'une maturation à 20°C [KJE96]. Ces cristaux semblent plus combinés avec ceux de C-S-H et sont de morphologie lamellaire et allongée [SCR92]. Cela découle d'une solubilité plus faible de la Portlandite favorisant ainsi sa nucléation grâce à une sursaturation plus rapide.

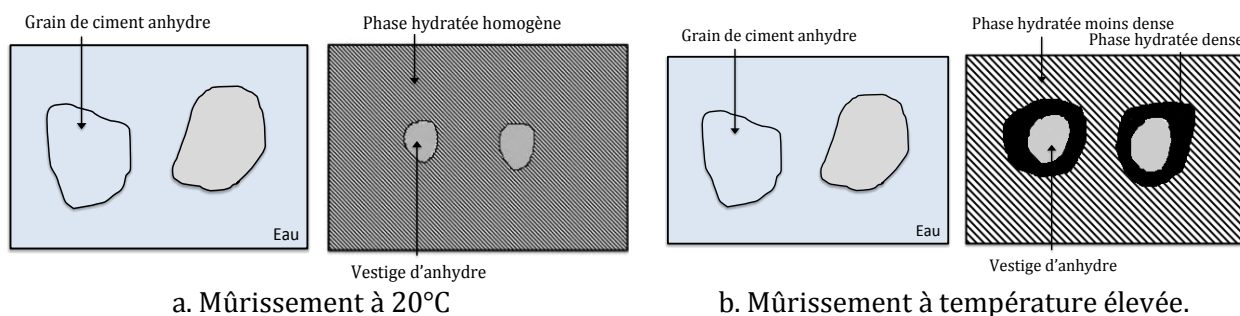


Figure 5.9 : *modification de l'hydratation en condition de température élevée pour les bétons vibrés selon la théorie de [VER68]*

Finalement, selon [OLD87], une matrice ayant subi une élévation de température renferme une quantité moindre d'eau chimiquement liée en comparaison à une matrice mûrie à 20°C.

La majorité des points cités précédemment ne pouvant pas être vérifiée par notre programme expérimental, l'absence d'effet néfaste de la hausse de température peut au moins être expliquée par des quantités d'eau chimiquement liée plus importantes pour les matériaux confectionnés en température que pour ceux à 20°C. Une quantité plus importante d'hydrates formés peut ainsi expliquer de meilleures performances mécaniques à long terme dans le cas des BAP, notamment lorsqu'ils sont fortement fillerisés (BAP1).

4.3.3 L'effet du filler calcaire

Les considérations précédentes (4.3.1 et 4.3.2) sur les causes microstructurales des évolutions de résistance ne prennent pas en compte l'effet physique causé par la présence de filler calcaire. Même si cette addition ne possède pas de pouvoir hydraulique ou pouzzolanique, elle permet, à température courante (20°C), la formation de carboaluminates de calcium hydratés. En plus de l'effet de densification du squelette granulaire, la présence de filler calcaire entraîne une accélération de la réaction d'hydratation du ciment [ESC88]. Elle est due à un effet de nucléation hétérogène ; la germination des phases hydratées se produit plus aisément au contact de grains de calcaire, ce qui entraîne une précipitation plus rapide des C-S-H et de la portlandite [HUS91, LAW03]. Cette germination a donc pour conséquence un double effet sur la matrice à l'état durci avec l'accélération de l'hydratation (cinétique) et la modification de l'arrangement des hydrates et de leurs liaisons (microstructure).

4.4 Hypothèses sur les modifications de la microstructure

A partir des résultats de résistances obtenues sur les BAP, après calage à compacité constante, tout en tenant compte de la maturité, à partir des résultats microstructuraux obtenus sur pâtes de ciment et des interprétations issues de la bibliographie, trois hypothèses sur le changement de comportement dans les évolutions des résistances mécaniques des BAP peuvent être ébauchées.

4.4.1 Le développement de l'hydratation en présence de filler

Selon la théorie de [VER68] présentée en figure 5.9., il est clairement établi que la baisse de performance à long terme causée par une élévation de température lors des premières heures d'hydratation est due à une répartition hétérogène des phases hydratées. A l'échelle des bétons autoplaçants, l'ajout à la phase liante de filler calcaire peut atténuer cette hétérogénéité selon deux aspects. Tout d'abord, on peut penser que le filler calcaire avec sa granularité plus fine en comparaison à celle du ciment et celle des fines du sable participe à la densification du matériau. Les particules de l'addition inerte de plus petites tailles s'inséreront dans les vides ce qui renforcera la compacité du squelette granulaire et favorisera les performances [CHA10]. La seconde hypothèse se base sur la théorie de [VER68] étendue au béton autoplaçant. Elle consiste à dire que la germination d'hydrate va être favorisée par l'accroissement du nombre de sites de nucléation. La figure 5.10 illustre le mécanisme de développement de l'hydratation en présence de filler. Près d'un grain de filler, la coquille d'hydrate dense (zone noire) va avoir tendance à s'étendre et à englober la particule inerte. Le développement de cette phase dense va se faire au détriment de la phase hydratée moins dense (zone hachurée). Donc grâce à l'ajout de filler calcaire, la proportion de la phase hydratée compacte sera plus importante ce qui amoindrira la répartition hétérogène des hydrates.

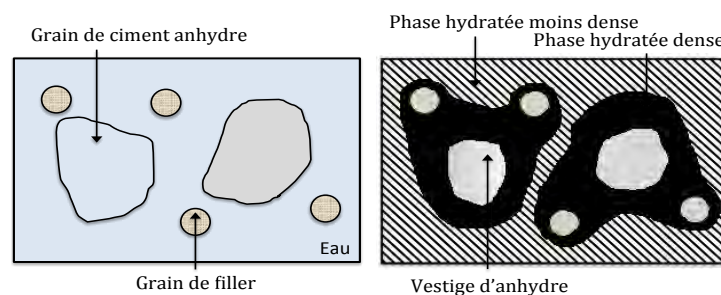


Figure 5.10 : *hypothèse basée sur la théorie de [VER68] sur l'hydratation d'une matrice fillérisée mûrie en température (matrice de type BAP).*

4.4.2 L'auréole de transition

Un point que nous n'avons pas soulevé jusqu'à présent est le rôle de l'auréole de transition (ITZ). Cette interface pâte/granulat influence grandement la résistance mécanique du béton car il s'agit d'une zone relativement poreuse dans laquelle la Portlandite a tendance à se développer de manière préférentielle. Il est vrai qu'au niveau de cette étude aucune information expérimentale ne peut être apportée sur la modification de cette zone. Les essais microstructuraux conduits sur pâtes ont permis une analyse fine des hydrates formés au sein de la matrice (dont CH) mais sans prendre en compte certains problèmes engendrés par les inclusions granulaires. Mais, en se basant sur la littérature traitant de ce sujet, certaines conjectures peuvent être établies.

Tout d'abord, afin d'assurer son autoplaçance, il est nécessaire pour un BAP de posséder un volume de pâte (ciment + addition + eau + SP) relativement important (330 à 400 l/m³). L'augmentation de la quantité de pâte engendre par conséquent une diminution du volume granulaire. Cela va se traduire par une baisse en nombre de granulats et donc une diminution de la surface granulaire offerte à la pâte. La réduction de cette surface va entraîner une diminution quantitative des auréoles de transition. La concentration de défaut associé à l'ITZ étant amoindrie, cela peut induire une amélioration globale des propriétés du BAP.

D'autre part, couplées à la température, les caractéristiques de l'hydroxyde de calcium évoluent en termes de solubilité, de cristallisation, ou de forme, induisant sûrement une modification de l'ITZ. Selon les études de [OLL81, KJE96], avec l'élévation de la température au jeune âge, la Portlandite dans cette zone s'ordonne en petits cristaux compacts. Cette morphologie va dépendre de la concentration en CH formée, de l'histoire de la température et des ponts chimiques pouvant se former entre le granulat et la matrice [CLA92, PAT95]. Avec la modification morphologique de cette phase et sa densification au niveau de la zone de faiblesse du béton, une amélioration des performances mécaniques peut être envisagée.

4.4.3 L'effet de l'adjuvantation

Pouvant être couplée aux deux précédentes, une dernière hypothèse peut expliquer les modifications bénéfiques observées à l'échelle des BAP ; elle est à mettre au crédit du superplastifiant. En effet, les molécules du superplastifiant de type polycarboxylate possèdent un double effet physique sur la dispersion des particules. La chaîne principale qui les compose est chargée négativement et permet l'adsorption de la molécule à la surface des particules par effet électrostatique. Cet effet repousse les particules en accroissant leur charge de surface (Figure 5.11.a). De plus, greffées sur la chaîne principale, des chaînes secondaires permettent une répulsion stérique par effet d'encombrement (Figure 5.11.b). Par ailleurs, il est montré que ces molécules présentent une très bonne efficacité de dispersion du filler calcaire dans des solutions à pH élevé (12,5) [MIK08], ce qui peut contribuer à accentuer encore la compacité de l'arrangement des particules les plus fines.

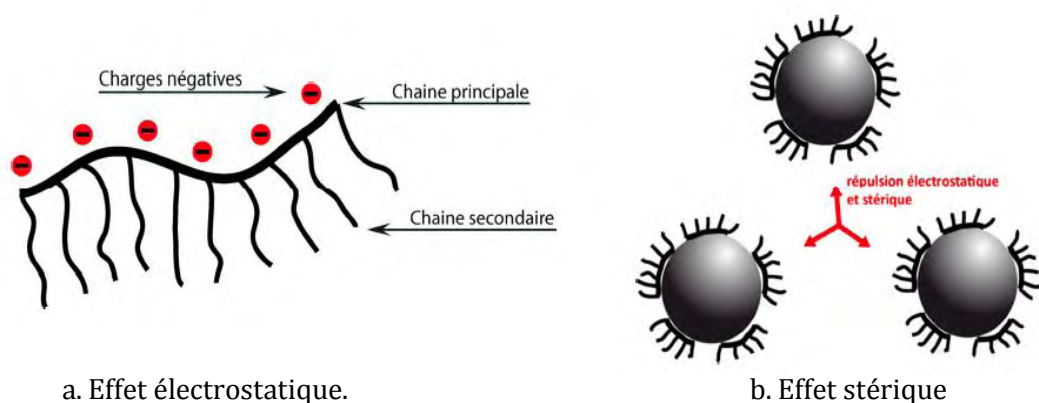


Figure 5.11 : molécule de superplastifiant : polycarboxylate [DIE10]

Ainsi, le superplastifiant pourrait agir en synergie avec le filler calcaire afin d'assurer une meilleure continuité des hydrates au sein de la microstructure à l'état durci par pontage entre les grains de poudre (ciment anhydre, filler, laitier). Le superplastifiant agirait alors comme une sorte de colonne vertébrale par pontage polymérique interparticulaire [PER04b]. L'hétérogénéité de la répartition des phases hydratées peut aussi être amoindrie grâce à l'effet stérique des molécules de polycarboxylate. Les grains pourraient être répartis de façon plus homogène dans la suspension grâce à une conformation des molécules du superplastifiant qui pourrait former un réseau réticulé. Finalement à l'état durci, les molécules de polycarboxylate se mêlant à l'hydratation de la matrice (binaire ou ternaire) peuvent générer des hydrates organo-minéraux qui participeront aux performances du matériau dans le temps [FLA01]. La Figure 5.12 propose une schématisation hypothétique prenant en compte le rôle joué par le superplastifiant.

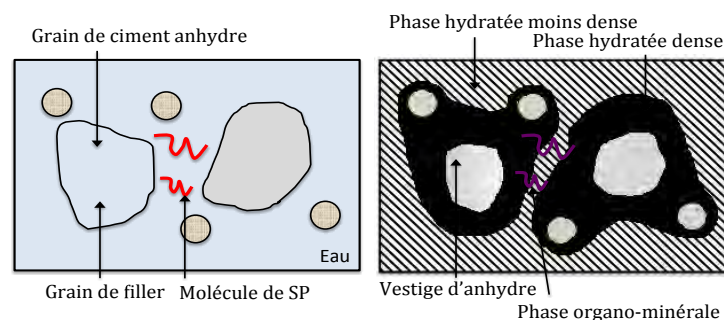


Figure 5.12 : *hypothèse sur l'hydratation d'une matrice fillérisée, adjuvantée et mûrie en température avec la prise en compte du superplastifiant.*

D'autres hypothèses peuvent être avancées comme par exemple l'effet retard des polycarboxylates qui peuvent contrecarrer l'effet accélérateur de la température.

4.5 Bilan

A ce stade de l'étude, les analyses thermiques nous ont permis d'avancer, avec l'aide de la littérature, des hypothèses sur le développement de la microstructure des BAP dans les conditions de confection et de mûrissement d'un temps chaud. Elles sont notamment basées sur le fait que l'incorporation de filler et de superplastifiant dans les matrices de BAP limite la répartition hétérogène des hydrates, cette répartition impliquant la baisse des résistances à long terme dans les bétons vibrés. Pour autant, ces hypothèses suscitent encore de nombreuses interrogations sur :

- l'effet du filler en température lors de la phase de germination,
- les cinétiques d'hydratation des matrices avec laitier en température,
- l'influence de la température sur la structuration de l'interface pâte/granulat,
- le rôle du superplastifiant en relation avec les trois points précédents.

C'est pourquoi des investigations complémentaires doivent être menées afin d'approfondir et de confirmer l'ensemble des hypothèses développées.

CHAPITRE 6

Influence du temps chaud sur les propriétés de durabilité et différées du BAP

1.	IMPACT SUR LES INDICATEURS DE DURABILITE	118
1.1	INTRODUCTION SUR LA DURABILITE	118
1.2	POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU	118
1.3	ABSORPTION D'EAU	119
1.4	PERMEABILITE A L'OXYGENE	120
1.5	DIFFUSION DES IONS CHLORURE. ESSAI DE MIGRATION	123
1.6	TENEUR EN PORTLANDITE	124
1.7	SYNTHESE ET DISCUSSION SUR DES CRITERES DE DURABILITE	125
2.	IMPACT SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DIFFEREES.....	128
2.1	AVANT-PROPOS	128
2.2	LE RETRAIT.....	129
2.3	LE FLUAGE SPECIFIQUE	130
2.4	PISTES D'EXPLICATION.....	131
3.	CONCLUSIONS SUR LES EVOLUTIONS DE PROPRIETES MECANIQUES DIFFEREES ET DE DURABILITE DES BAP CONFECTIONNES ET MURIS PAR TEMPS CHAUD	135

Après avoir étudié l'impact d'un bétonnage par temps chaud à l'état durci sur les comportements mécaniques instantanés du BAP, il est relativement important d'étudier sa tenue dans le temps. En effet, le matériau « béton » est conçu pour être pérenne et résister à toutes agressions de l'environnement extérieur durant sa phase de service. Les durées de vie garanties par les textes normatifs [EN206-1] sont respectivement de 50 ans et inférieures à 100 ans pour les bétons de bâtiments ou d'ouvrages d'art.

A ce stade de l'étude, il est donc essentiel de se demander si une hausse de température de confection et/ou de mûrissement peut engendrer une variation de propriétés à long terme. En d'autres mots, on peut se demander si les hypothèses avancées sur le développement de la microstructure (chapitre 5) ont une traduction sur la durabilité et les propriétés mécaniques différées qui sont maintenant étudiées dans ce dernier chapitre.

1. IMPACT SUR LES INDICATEURS DE DURABILITE

1.1 Introduction sur la durabilité

Dans le temps, une des préoccupations majeures pour le béton est d'assurer une durabilité à toutes dégradations issues du milieu extérieur. En effet, les attaques physiques et chimiques de l'environnement peuvent conduire à une altération de la durabilité du matériau et ainsi aboutir à une altération de ses propriétés à l'état durci. Ces détériorations sont généralement des phénomènes complexes faisant intervenir des écoulements de fluide à travers la matrice poreuse.

Ainsi l'absorption, la perméation et la diffusion sont les trois mécanismes qui peuvent amener des substances agressives à pénétrer dans le matériau. L'eau, l'oxygène sont deux fluides naturels qui peuvent se déplacer dans le réseau poreux d'un matériau et remettre en cause sa durabilité. Afin d'apprécier l'impact d'un bétonnage par temps chaud sur les propriétés de durabilité des BAP, des mesures d'indicateurs de durabilité généraux sont réalisées. Les évolutions des propriétés de porosité, d'absorption d'eau, de perméabilité à l'oxygène, de diffusivité des ions chlorure et de teneur en Portlandite des matériaux ont été étudiées. Expérimentalement, l'ensemble des essais a été réalisé au-delà de 35 jours de cure humide (Chap.2.§4.2.).

1.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau traduit le volume de vide ouvert sur le volume total du béton. Cette grandeur informe sur la capacité du matériau à se laisser pénétrer par des agents agressifs (porosité ouverte). La Figure 6.1 présente les valeurs de porosité accessible à l'eau pour les trois BAP mûris selon les règles des éprouvettes de contrôle ou à l'encontre de ces règles.

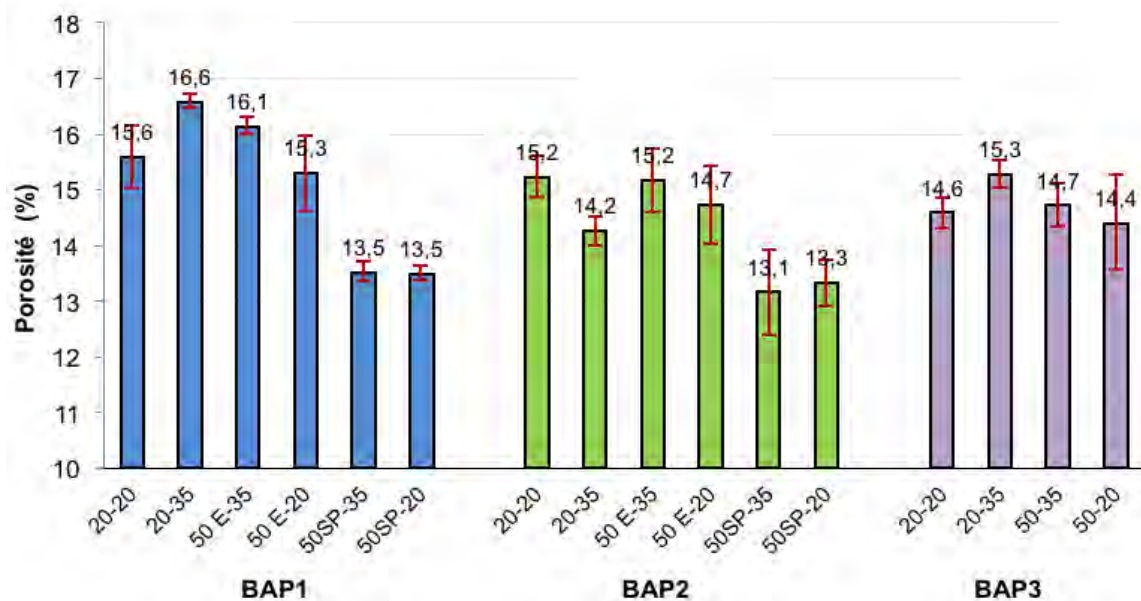


Figure 6.1 : valeurs de la porosité accessible à l'eau (moyenne et dispersion) obtenues pour les différents BAP.

A partir des résultats de la figure 6.1, deux tendances semblent se dégager. La première concerne les bétons incorporant du filler calcaire (BAP1 et BAP2); le bétonnage par temps chaud semble modifier de manière légère la porosité. Comparativement aux matériaux confectionnés à 20°C (20-20), on observe qu'un ajout d'eau permettant de maintenir les propriétés rhéologiques n'augmente pas significativement cette grandeur. Dans ce cas, l'augmentation de la quantité d'eau d'apport qui a été compensée par l'évaporation générée lors de la hausse de température des constituants (chapitre 3) n'a pas d'incidence sur le volume poreux. D'autre part, avec un surdosage en superplastifiant, les bétons fillérisés gâchés à température élevée présentent une diminution de la porosité. Ce résultat peut s'expliquer par un double effet généré par la défloculation des grains de ciment et par une diminution du rapport E/C due à l'évaporation de l'eau lors du gâchage (chapitre 3).

La seconde tendance est observée sur les matériaux confectionnés avec la matrice ternaire (BAP3). Pour une phase liante à base de laitier, une hausse des températures de confection et de maturation ne semblent pas affecter significativement cet indicateur de durabilité.

1.3 Absorption d'eau

L'absorption d'eau traduit la capacité d'un béton à se faire pénétrer par l'eau durant une phase d'immersion totale. Selon les textes normatifs [EN206-1], [EN13369], cette grandeur est le seul indicateur de durabilité utilisé pour l'approche prescriptive de la formulation des bétons. La figure 6.2 présente les résultats obtenus sur les différents bétons mesurés selon la méthode [EN13369].

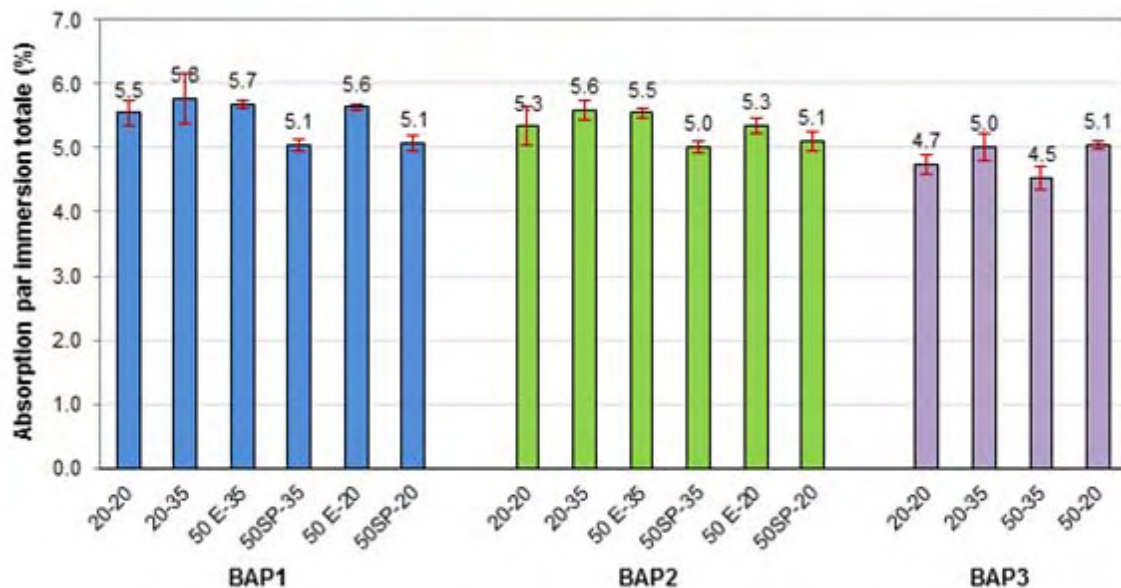


Figure 6.2 : valeurs (moyenne et dispersion) de l'absorption d'eau par immersion totale, obtenues selon [EN13369]

A partir des résultats observés sur la figure 6.2, aucune tendance ne se dégage selon le type de matrice utilisée (liant binaire plus ou moins fillérisé ou liant ternaire). D'autre part, pour un mélange donné, la hausse de température, qu'elle soit de confection ou de maturation, ainsi que le moyen de maintenir la rhéologie n'affecte pas significativement cette propriété d'absorption. D'un point de vue normatif, les valeurs comprises entre 4,5% et 5,8% correspondent à des bétons de durabilité considérée comme moyenne (tableaux NA.F.1 et NAF.2., [EN206-1]).

1.4 Perméabilité à l'oxygène

La perméabilité traduit l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression motrice. Elle va informer sur l'interconnectivité et la tortuosité du réseau poreux. Dans cette étude, la perméabilité à l'oxygène est mesurée à partir de la méthode Cembureau [AFPC 97]. La figure 6.3. présente la manière de traiter les résultats de ce type d'essai. Pour cette étude, deux paramètres sont étudiés.

- La perméabilité intrinsèque (k_{int}) traduisant le comportement à l'écoulement laminaire du fluide au travers du matériau.
- La perméabilité apparente calculée pour une pression d'entrée de 0,2MPa ($k_a(0,2MPa)$) permettant de classer les bétons selon leurs durabilités potentielles [BAR04].

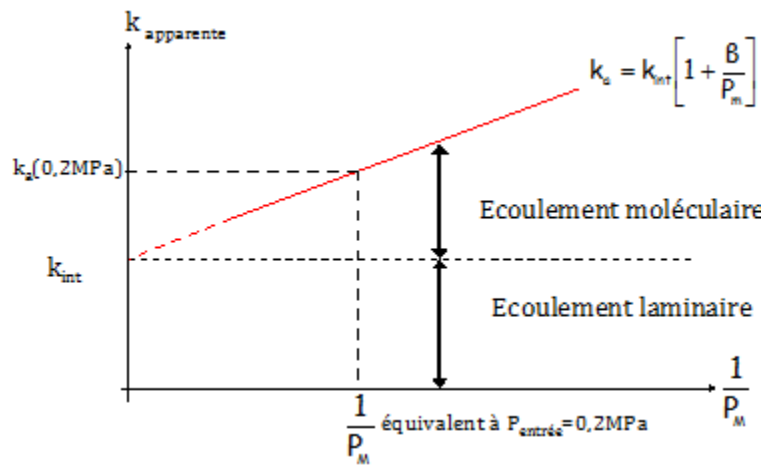


Figure 6.3 : traitement des résultats d'un essai de perméabilité à l'oxygène pour un matériau sec ($T^{\circ}C_{\text{séchage}}=105^{\circ}C$).

La figure 6.4 présente les résultats de perméabilité intrinsèque obtenus graphiquement à partir des valeurs apparentes déterminées expérimentalement à partir de 3 pressions d'essai (2, 3, 4 Bars) [AFPC 97].

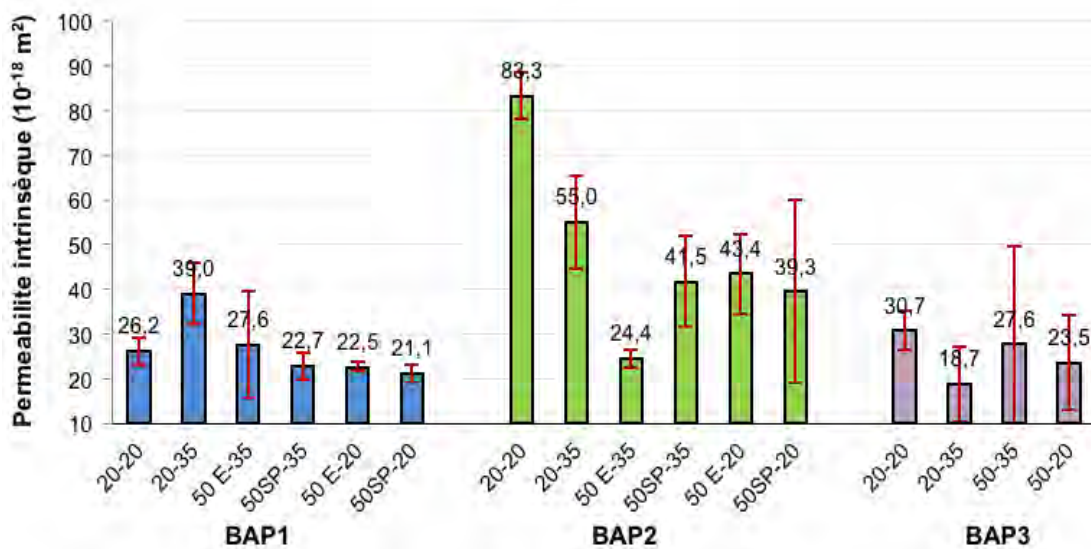


Figure 6.4 : valeurs (moyenne et dispersion) de la perméabilité intrinsèque pour les différents BAP.

A partir des valeurs intrinsèques, on peut observer plusieurs points.

- La température n'influe pas significativement sur la perméabilité quelle que soit la matrice utilisée (liants binaires plus ou moins fillérisés et liant ternaire).
- La matrice la plus fillérisée (BAP1 avec F/C=0,5) présente de meilleurs résultats comparativement à BAP2 confectionné avec une matrice moins fillérisée (F/C=0,25). Dans ce cas, une teneur plus importante en filler semble renforcer la compacité de la matrice se répercutant sur les chemins percolants et par conséquent sur la propriété de perméabilité.

- La matrice incorporant du laitier présente de bons résultats (identiques à ceux de BAP1). Dans ce cas, le bénéfice de performance est à mettre au crédit de l'effet chimique du laitier qui a la capacité à s'hydrater et ainsi de former de nouveaux hydrates à plus long terme.

L'effet physique du filler et/ou l'activité chimique du laitier se répercutent sur la perméabilité du matériau induisant une modification de la tortuosité et de la connectivité du réseau poreux. Malgré ces faibles variations (même gamme de valeurs pour l'ensemble des bétons), il est très difficile avec cet essai de définir l'effet de la température sur les deux caractéristiques, de manière séparée.

Le Tableau 6.1 présente les résultats de perméabilité apparente pour une pression d'essai de 0,2MPa. Ces valeurs permettront d'établir une classification des bétons selon la méthodologie de [BAR04].

Tableau 6.1 : valeurs de perméabilité apparente mesurées pour une pression d'entrée de 0,2MPa.
(10^{-18}m^2)

T°C confection-T°C maturation- Maintien de rhéologie	BAP1	BAP2	BAP3
20-20	500,9	534,4	661,9
20-35	128,8	111,0	178,8
50E-35	92,6	64,4	65,0*
50SP-35	46,6	154,9	
50E-20	80,1	132,0	82,2*
50SP-20	79,6	388,1	
* BAP3 ne nécessite pas une action de maintien de rhéologie par ajout d'eau ou par surdosage en SP lors d'un gâchage à 50°C.			

Selon la classification basée sur les seuils de coefficient de perméabilité apparente [BAR04], trois familles de durabilité potentielles sont identifiables pour nos matériaux.

Les matériaux gâchés et mûris à 20°C présentent une durabilité potentielle faible ($300 < k_a(0,2\text{MPa}) < 1000 \times 10^{-18} \text{m}^2$). Avec un gâchage à 20°C et une maturation à 35°C, la durabilité potentielle semble être améliorée (durabilité moyenne pour l'intervalle $100 < k_a(0,2\text{MPa}) < 500 \times 10^{-18} \text{m}^2$). Pour BAP1 et BAP3 (matrice avec une forte teneur en addition) dès que la température de confection augmente (50°C), la durabilité potentielle est considérée comme élevée ($10 < k_a(0,2\text{MPa}) < 100 \times 10^{-18} \text{m}^2$). En revanche pour BAP2 (plus faiblement fillérisé que BAP1), la durabilité potentielle n'est pas autant améliorée avec l'élévation de la température ; dans ce dernier cas, la durabilité potentielle est considérée comme moyenne ($100 < k_a(0,2\text{MPa}) < 500 \times 10^{-18} \text{m}^2$).

1.5 Diffusion des ions chlorure. Essai de migration

La diffusivité, complémentaire à la perméation vis-à-vis des agressions extérieures, est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Dans le cas de cette étude, la migration, diffusion sous champ électrique, des ions chlorure a été étudiée selon le protocole [NT BUILD 492]. La Figure 6.5 présente les valeurs de coefficient de migration mesurées en régime non permanent pour les trois BAP étudiés.

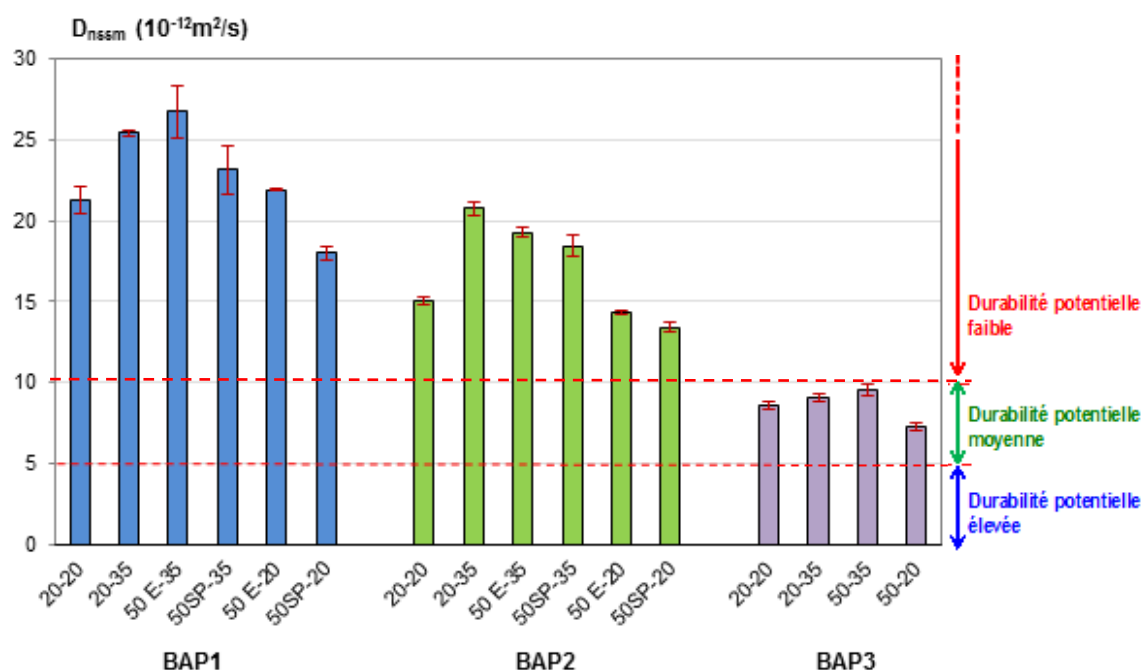


Figure 6.5 : valeurs (moyenne et dispersion) du coefficient de migration des ions chlorure établies en régime transitoire selon [NT BUILD 492].

En première observation, on peut établir un classement des matrices selon leur diffusivité vis-à-vis de cette espèce chimique : la matrice la plus diffusive étant la matrice fortement fillérisée (BAP1), suivie par la matrice plus faiblement fillérisée (BAP2). Le béton présentant un bon comportement à la pénétration des ions Cl^- est confectionné avec une matrice ternaire à base de laitier (BAP3).

En analysant chaque formule de manière séparée, on peut constater qu'une maturation à 35°C augmente légèrement le coefficient de migration quelle que soit la solution de maintien de rhéologie employée (ajout d'eau ou surdosage en adjuvant). En revanche, avec une maturation à 20°C, cette grandeur ne semble pas être affectée de manière significative.

A partir des classes indicatives relatives à cet indicateur général [BAR04], il ressort de cette série de mesures que les bétons à matrice binaire (BAP1 et BAP2), quelle que soit la température de confection ou de maturation, présentent des durabilités potentielles faibles ($10 < D_{nssm} < 50 \cdot 10^{-12} m^2/s$).

Tableau 6.2 : teneur en Portlandite calculée et mesurée expérimentalement (% par rapport à la masse de ciment).

Teneur en Ca(OH)_2	BAP1		BAP2		BAP3	
	20-20	50E-35	20-20	50E-35	20-20	50-35
calculée selon [BAR04].	28,0	28,0	27,9	27,9	0,0	0,0
mesurée par analyse thermique (ATG).	/	/	33,1	25,2	5,8	5,0

En premier lieu, il faut noter que les résultats obtenus par le calcul sont bien confirmés par la méthode de détermination expérimentale. A partir du tableau, on peut considérer que les bétons avec une matrice binaire (clinker + filler) présente une durabilité potentielle vis-à-vis de la corrosion des armatures très élevée selon la classification de [BAR04].

En revanche, pour les bétons à matrice ternaire incorporant du laitier (BAP3), cette même durabilité potentielle est considérée comme très faible. Mais, il faut rester prudent sur cette conclusion car la classification ne prend en compte que les aspects chimiques de la dégradation associée à la carbonatation (cinétique de transformation des phases). Les modifications du réseau poreux associées à la barrière physique (diminution de la diffusivité au travers du réseau poreux, cf. Figure 6.5.) ne sont pas considérées dans cette classification.

1.7 Synthèse et discussion sur des critères de durabilité

A ce stade du développement, une synthèse des résultats est nécessaire afin d'apprécier l'impact des conditions de confection et de maturation sur les propriétés de transfert des BAP.

A partir de l'ensemble des résultats relatifs aux propriétés de durabilité, il apparaît que la matrice cimentaire ternaire (clinker, filler calcaire, laitier) semble plus performante comparativement aux matrices binaires uniquement fillérisées. Sur ces aspects de durabilité, on peut dire que l'effet chimique résultant de l'hydratation latente du laitier pour la matrice ternaire (clinker + filler + laitier) semble plus efficace que le simple effet physique (augmentation de la compacité) engendré par l'incorporation de filler calcaire dans les matrices binaires (clinker + filler).

Pour une matrice donnée, il semble qu'à l'échelle d'un béton autoplaçant, l'élévation de température de gâchage et/ou de maturation ne modifie pas significativement le réseau poreux impliquant la faible variation des propriétés de transfert. Sur ces critères de durabilité, le comportement du BAP (observation faites avec trois matrices différentes) semble différent de celui des bétons vibrés où l'on peut observer une baisse de performance de durabilité [MOU97], [MOU99]. Le faible impact de la température sur ce type de matériau peut être mis au crédit des évolutions microstructurales et des variations de produits d'hydratation en quantité et en réactivité (cf. Chap.5. §4.3). D'autre part, certaines hypothèses avancées pour les améliorations des

performances mécaniques peuvent être reprises pour les propriétés de transfert. Avec l'élévation de température, on peut évoquer :

- l'effet du filler permettant une meilleure redistribution des phases hydratées grâce à l'effet de germination hétérogène (cf. chap5. §.4.4.a.).
- l'impact du volume de pâte de ciment et de la morphologie de la Portlandite sur la concentration et les propriétés de l'ITZ (cf. chap5. §.4.4.b.).
- l'effet de l'adjuvant pouvant générer des phases hydratées organo-minérales (cf. chap5. § 4.4.c.).

Basé sur des valeurs limites indicatives relatives aux indicateurs de durabilité généraux, le tableau 6.3 synthétise les classes de durabilité potentielle des bétons autoplacants étudiés. Pour la quasi-totalité des indicateurs étudiés, il ressort que comparativement à la classe du matériau de référence (BAPi-20-20 en gras dans le tableau) les classes des bétons ayant subi une élévation de la température sont, soit équivalentes, soit améliorées. Pour le praticien, ces résultats obtenus sur les propriétés de transfert pour les bétons autoplacants sont donc réconfortants en cas de bétonnage par temps chaud.

Tableau 6.3 : récapitulatif des durabilités potentielles des BAP de l'étude selon la classification de [BAR04]

Durabilité potentielle	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Porosité accessible à l'eau	BAP1-20-35, BAP1-50E-35	<u>BAP1-20-20</u> BAP150E-20 BAP1-50SP-35 BAP1-50SP-20 <u>BAP2-20-20</u> L'ensemble des BAP2 <u>BAP3-20-20</u> L'ensemble des BAP3			
Coefficient de diffusion des ions Cl ⁻ (essai par migration)		<u>BAP1-20-20</u> L'ensemble des BAP1 <u>BAP2-20-20</u> L'ensemble des BAP2	<u>BAP3-20-20</u> L'ensemble des BAP3		
Perméabilité apparente au gaz (à pression d'entrée 0,2MPa à l'état sec)		<u>BAP1-20-20</u> , <u>BAP2-20-20</u> , <u>BAP3-20-20</u> , BAP2-50SP-20	BAP1-20-35, BAP2-20-35, BAP2-20-35, BAP2-50SP-35, BAP2-50SP-20	BAP1-50E-35, BAP1-50SP-35, BAP1-50E-20, BAP1-50SP-20, BAP2-50E-35, BAP3-50-35, BAP3-50-20	
Teneur en Ca(OH) ₂ *	<u>BAP3-20-20</u> L'ensemble des BAP3				<u>BAP1-20-20</u> L'ensemble des BAP1 <u>BAP2-20-20</u> L'ensemble des BAP2
* Indicateur renseignant sur la durabilité potentielle vis-à-vis de la corrosion des armatures.					

2. IMPACT SUR LES PROPRIETES MECANQUES DIFFEREES

Les bétons étudiés pouvant entrer dans la conception d'éléments structuraux sont susceptibles d'être sensibles à toutes modifications dimensionnelles. Ces variations dimensionnelles, instantanées et différées, risquent à terme de modifier la géométrie de la pièce initialement calculée en bureau d'étude. Il est donc primordial de vérifier l'influence d'un bétonnage par temps chaud sur les déformations différées d'un béton autoplaçant. Ces déformations différées sont généralement dissociées en déformation spontanée (retrait) et en déformation sous chargement constant (fluage).

2.1 Avant-propos

Afin d'éviter une étude systématique sur l'ensemble des matériaux, nous avons pris le parti de ne sélectionner que certaines formulations. Nous avons donc décidé d'étudier le BAP2 et BAP3 car ils ont une teneur en liant équivalent très similaire mais avec une différence marquée de la nature (matrice binaire et ternaire). De plus, on a choisi les modes de confection/maturation extrêmes pour juger ou non d'une différence de comportement. Par extrême, nous entendons les paramètres qui peuvent, à priori, influencer le fluage : température et teneur en eau : condition de référence 20-20 et condition de confection à 50°C et de maturation à 35°C en maintenant la consistance par ajout d'eau (hausse de la quantité d'eau influençant le fluage). Ainsi, les comportements différés de quatre bétons (BAP2-20-20, BAP2-50E-35, BAP3-20-20 et BAP3-50-35) ont été suivis dans le temps.

D'un point de vue expérimental, certaines précisions doivent être apportées.

Pour le retrait, les mesures ont débuté à 3 jours après le démoulage des échantillons. Pour une même formulation de béton à l'état durci, les échantillons sont testés selon deux modes de conservation. Le mode endogène représente le comportement au cœur du béton puisqu'il est obtenu expérimentalement en empêchant tout échange hydrique avec l'extérieur. Le mode total, en plus de prendre en compte le retrait endogène, considère le gradient hydrique entre l'éprouvette ($HR > 85\%$) et la salle dans laquelle sont stockés les échantillons ($HR = 55\%$). Il faut noter que le retrait de dessiccation n'est pas une mesure directe car il est obtenu par l'intermédiaire de la mesure de retrait total et endogène [PRO02].

Pour le fluage, les valeurs de déformations sont mesurées sur éprouvettes cylindriques selon le protocole [RILEM TC107-CSP]. Ces variations dimensionnelles axiales sont suivies de 7 à 100 jours, avec un taux de chargement de 40% de la résistance en compression (R_{c7j}) et selon les deux modes de conservation explicités précédemment (total et endogène). Les résultats de fluage sont présentés en valeurs spécifiques, c'est-à-dire que les valeurs de déformation de fluage sont divisées par la valeur de contrainte appliquée.

2.2 Le retrait

La figure 6.6 présente l'évolution des déformations de retrait dans le temps en modes total, endogène et de dessiccation pour les quatre bétons étudiés.

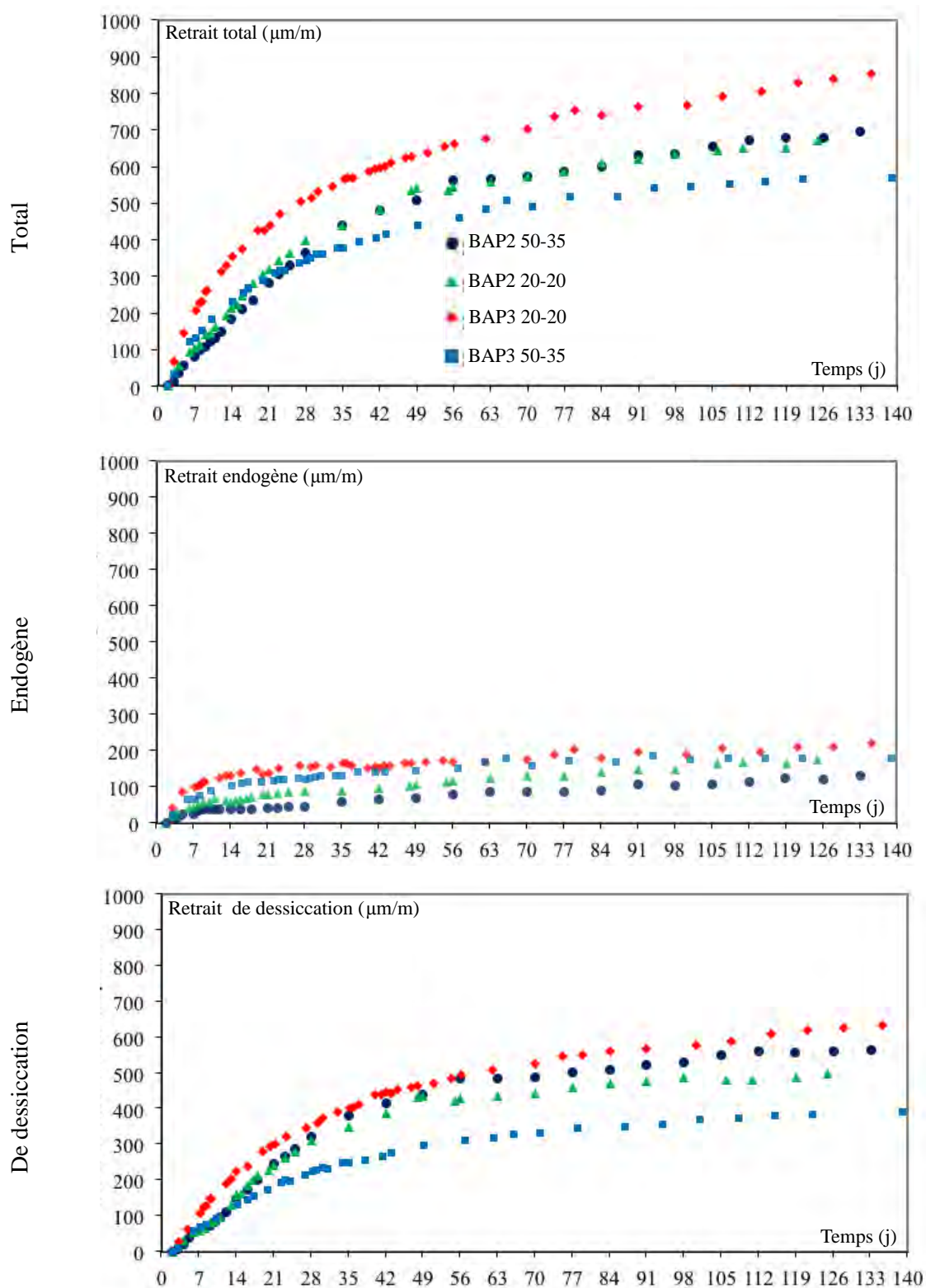


Figure 6.6 : évolution du retrait dans le temps pour les BAP étudiés.

A partir de ces figures, on constate en premier lieu que le BAP2 présente un comportement identique qu'il soit gâché à 20°C ou à température élevée. Cette constatation est vraie pour les deux modes de conservation mais aussi en mode dessiccation (par déduction). Il semblerait donc qu'une élévation de température n'affecte pas les propriétés de retrait d'une matrice binaire fillérisée.

En revanche, en ce qui concerne le matériau à matrice ternaire à base de laitier (BAP3), il semblerait qu'une variation de comportement apparaisse pour une élévation de la température. En effet, en observant le comportement des deux matériaux, le béton gâché à 20°C présente des déformations totales beaucoup plus importantes que le BAP gâché à 50°C. Cette variation de retrait peut s'expliquer par la sensibilité du matériau à la dessiccation car en mode endogène peu de variations sont observables. Ce type de modification due au départ d'eau de la matrice est généralement à associer aux variations du réseau poreux. En comparant ces résultats à ceux traduisant les propriétés du réseau poreux (cf.§.1.), on s'aperçoit que la porosité, l'absorption d'eau, la perméabilité ou la diffusivité de ces deux matériaux ne varient pas significativement.

Il faut aussi rappeler à ce niveau d'analyse que la mesure du développement du retrait a seulement commencé 3 jours après le démoulage. En procédant de la sorte, on aurait tendance à gommer une partie de l'histoire du matériau où l'hydratation est la plus active ; ce qui peut expliquer en partie les tendances observées en figure 6.6. Les graphes montrent qu'au niveau du retrait, le BAP2 a un comportement identique qu'il soit gâché à 20°C ou à température élevée. Par ailleurs, le début tardif des mesures peut expliquer aussi en partie pourquoi pour le BAP3, les résultats de retrait et ceux traduisant les propriétés du réseau poreux sont contradictoires.

Une explication peut être apportée en analysant les variations d'hydratation mesurées sur pâte de ciment. Ce développement sera approfondi dans la partie suivante après les analyses effectuées pour le fluage (cf.§.2.3.).

2.3 Le fluage spécifique

La figure 6.7 présente l'évolution des déformations de fluage spécifique pour BAP2 et BAP3 gâchés à 20°C ou à 50°C et muris à 20°C ou à 35°C. Les résultats sont présentés pour les modes total et endogène.

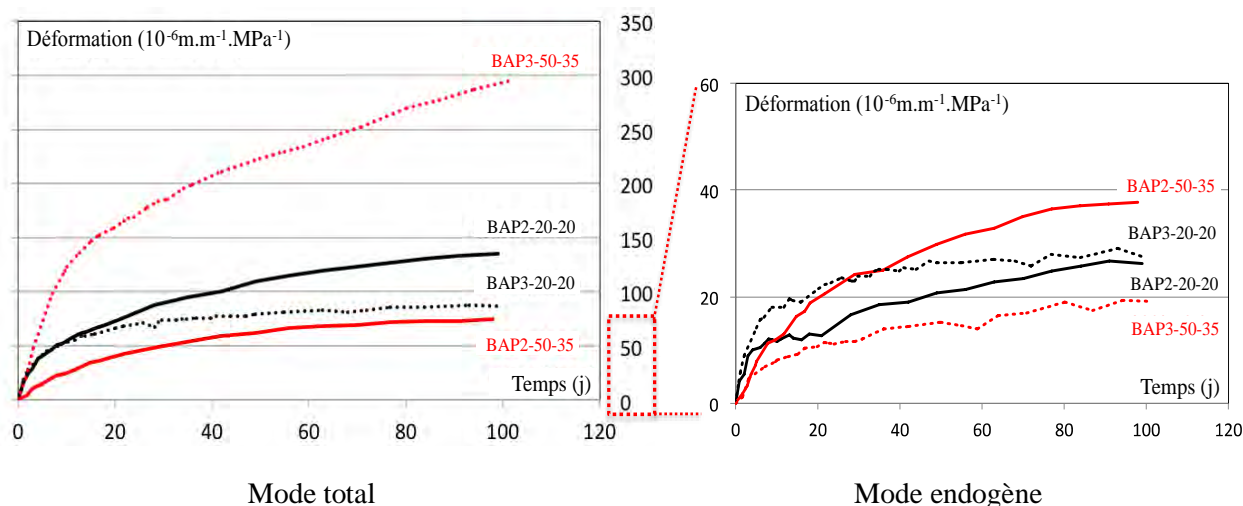


Figure 6.7 : évolution du fluage spécifique en mode total et endogène pour les BAP étudiés.

A partir des résultats obtenus, on peut noter que pour BAP3 confectionné à partir d'une matrice ternaire (clinker, laitier et filler calcaire) et gâché à température élevée, le fluage spécifique total est plus important en comparaison des autres bétons testés. Si l'on s'intéresse au comportement des mêmes bétons mais vis-à-vis du fluage spécifique en mode endogène (sans échange hydrique avec le milieu extérieur), on n'observe aucune variation particulière dans le temps puisque les résultats sont dans le même ordre de grandeur quel que soit le béton étudié.

Ces observations, quoique contradictoires avec les résultats de retrait, ont été confirmées pour le même type d'essai mais avec une mise en chargement effectué à 28 jours¹.

2.4 Pistes d'explication.

Il ressort de l'analyse de premier niveau que le béton incorporant du laitier, confectionné et mûri en température élevée (BAP3-50-35), présente un fluage spécifique en dessiccation relativement important. Malgré les avantages indéniables dont a fait preuve ce mélange sur des critères de comportement à l'état frais, mécanique et de durabilité, la nette augmentation de cette propriété différée s'avère problématique. Il est donc nécessaire de comprendre les causes de cette défaillance dans le temps. Trois pistes sont envisageables pour expliquer la hausse de déformabilité de BAP3 soumis à un bétonnage par temps chaud :

- une variation des produits d'hydratation,
- une modification du réseau poreux,
- l'apparition d'un endommagement dû à un fluage secondaire.

¹ Les résultats de fluage spécifique avec une mise en charge à 28 jours sont présentés en annexe 10.

Piste 1. Une variation des produits d'hydratation.

Afin d'explorer cette piste, nous pouvons reprendre les résultats déjà discutés dans le chapitre précédent (Chap5.§.4.2.). Ils sont obtenus à partir d'essais d'analyses thermiques (ATG et dTG/dt) réalisés sur pâtes de ciment issues de la matrice de BAP3. Le tableau 6.4 présente ces résultats quantitatifs à long terme.

Tableau 6.4 : exploitations quantitatives des analyses thermiques pour BAP3 à long terme (28 jours).

	% d'eau liée chimiquement	qCSH+CAH
P-BAP3 20-20	10,26	53,2
P-BAP3 50-35	9,45	55,7

A partir de ce tableau, on constate que pour la matrice ternaire à base de laitier, l'élévation de température n'affecte ni la quantité d'eau chimiquement liée, ni la quantité d'hydrates formés comparativement à un matériau traité à condition normale (20-20). Il semblerait donc que les investigations microstructurales ne permettent pas d'expliquer cette élévation importante de fluage pour BAP3.

Piste 2. Une modification du réseau poreux.

La seconde piste à explorer concerne l'évolution du réseau poreux du matériau. Le tableau 6.5 présente les résultats de porosité, d'absorption d'eau, de perméabilité à l'oxygène et de migration des ions Cl⁻ (cf. Chap6 §1).

Tableau 6.5 : propriétés de transferts mesurées pour BAP3.

	Porosité accessible à l'eau (%)	Absorption d'eau (%)	Perméabilité intrinsèque (10 ^{-m²})	DCl ⁻ _{nssm} (10 ⁻¹² m²/s)
BAP3 20-20	14,6±0,3	4,7±0,2	30,7±4,3	8,6±0,2
BAP3 50-35	14,7±0,4	4,5±0,2	27,6±2,2	9,6±0,4

Concernant le réseau poreux de cette matrice ternaire, il apparaît que la température n'a pas d'impact sur le volume global poreux (porosité), sur le réseau de pores capillaires (absorption), sur la connectivité et sur de la tortuosité (perméabilité) et sur la diffusivité (migration des Cl⁻). L'accroissement de fluage pour BAP3-50-35 ne peut donc pas s'expliquer par une modification particulière du réseau poreux.

Piste 3. Le développement parasite d'un fluage secondaire.

Comparativement aux trois bétons présentant des allures de courbes identiques (BAP2-20-20, BAP2-50-35, BAP3-20-20), le béton BAP3-50-35 présente une allure de courbe différente. En

effet, pour les trois bétons, la stabilisation de la déformation semble rapidement acquise sur le temps d'investigation. Malgré un ralentissement de la vitesse de déformation, ce n'est en revanche pas le cas de BAP3-50-35 pour lequel on observe un développement monotone croissant de cette déformation. Ce type d'évolution peut être assimilé à un fluage secondaire s'accompagnant généralement d'une phase d'endommagement. Dans cette phase de fluage secondaire, les forts niveaux de dessiccation couplée à la contrainte de compression génèrent une microfissuration du matériau dont la progression modifie de manière significative la déformation de fluage [GET93]. Selon [CHE93] (cf. figure 6.8), [BOU95], le développement encore important des déformations dans cette phase secondaire s'associe à un phénomène de déformations dilatantes du béton par croissance rapide de la microfissuration au sein de la pâte de ciment.

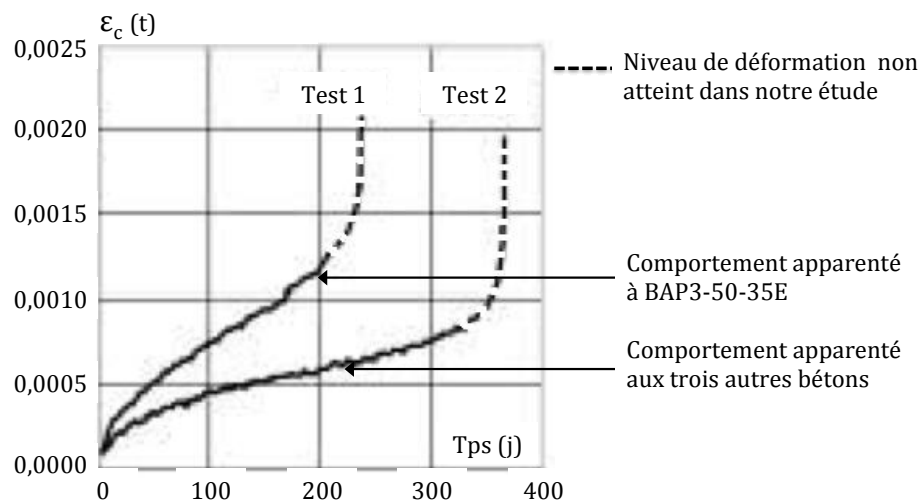


Figure 6.8 : courbes expérimentales de rupture par fluage en compression avec observation d'un fluage secondaire [CHE93].

Les causes de ce fluage anormalement élevé pour ce béton sont donc à chercher au niveau de la matrice cimentaire qui semble présenter, sous chargement, une sensibilité relativement importante à la dessiccation dès 7 jours. A cet âge, une mise en charge précoce couplée à une hydratation peu développée peut favoriser le départ d'eau car l'interconnectivité du réseau poreux, faiblement développé, est peu segmentée. Il résultera donc de cette dessiccation accrue un cumul de déformation due au retrait de dessiccation (contraction du ménisque d'eau à l'échelle des pores capillaires) et aux déformations sous charge en dessiccation (déformation viscoélastique sous chargement constant). Le résultat final de cette dessiccation importante est l'apparition d'une microfissuration interne générant ainsi le fluage secondaire généralement associé à de l'endommagement [POH98].

Cette piste peut être appuyée par l'allure de la courbe de BAP3-50-35 de la figure 6.9 qui présente l'évolution du retrait en dessiccation en fonction de la perte de masse des échantillons. Tout

d'abord, on peut observer deux types de tendances relatives à la nature de la matrice (BAP2 et BAP3) et indépendantes des conditions de température. D'autre part, pour les bétons possédant un comportement de fluage identique (BAP2-20-20, BAP2-50-35 et BAP3-20-20), on observe une continuité dans l'évolution du retrait en fonction de la perte de masse. Cette évolution traduit un comportement normal de retrait de dessiccation avec une déformation différée générée par le départ d'eau du réseau poreux se traduisant par la contraction de ses pores.

En revanche pour BAP3-50-35, une inflexion de la pente apparaît ce qui peut s'interpréter par un endommagement issu d'une microfissuration. En effet, cette microfissuration pourrait accélérer le départ d'eau présent au sein de la matrice et ainsi favoriser le développement du fluage secondaire.

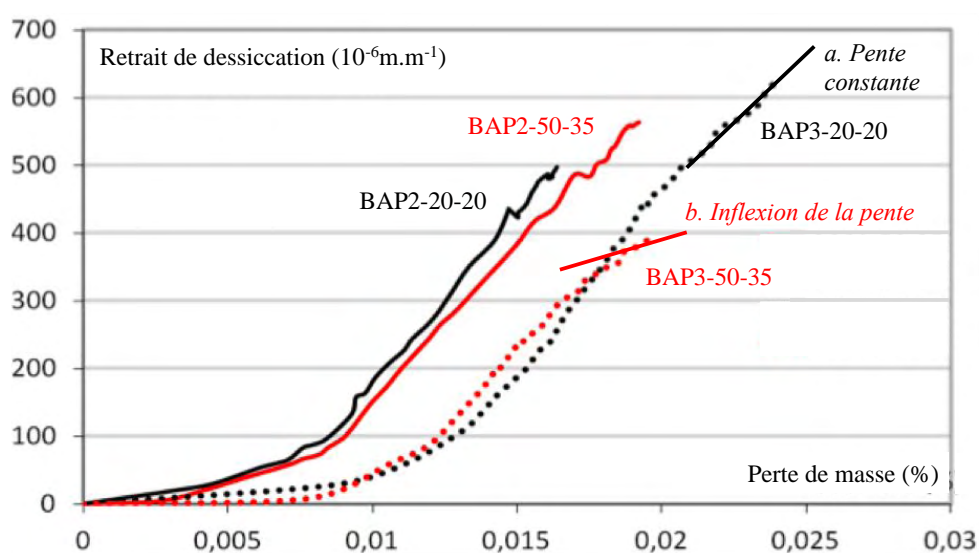


Figure 6.9 : retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse due à l'évaporation.

Pour conclure, il apparaît donc que sur des considérations de fluage le BAP3 confectionné à partir d'une matrice ternaire et gâché à température élevée présente un comportement atypique. En effet, la figure 6.9 montrant l'évolution du retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse permet d'attribuer l'origine d'un fluage secondaire à l'apparition d'une microfissuration interne. Pour valider davantage cette hypothèse, il aurait été intéressant de faire des essais de fluage sur le BAP3 à différents niveaux de contrainte et pas uniquement à un niveau de 40%. En effet, même si le BAP3 se microfissure plus que les autres bétons étudiés en cas de dessiccation, une fois que l'éprouvette est chargée de manière permanente en compression, cela permet de refermer en partie les fissures et donc de mobiliser plus de retrait. Quand l'éprouvette est non chargée, ce n'est qu'un retrait de dessiccation apparent qui est mesuré (bien moindre que le retrait intrinsèque du béton). Or pour calculer le fluage spécifique, les mesures de retrait apparent ont été utilisées, ce qui ne présente qu'une partie du retrait potentiel.

3. CONCLUSIONS SUR LES EVOLUTIONS DE PROPRIETES MECANQUES DIFFEREES ET DE DURABILITE DES BAP CONFECTIONNES ET MURIS PAR TEMPS CHAUD

Dans ce dernier chapitre consacré aux évolutions des propriétés du matériau dans le temps, deux aspects ont été étudiés : la durabilité et les déformations différées.

Concernant les propriétés de transfert, elles sont globalement peu affectées par une élévation de température lors de la phase de conception et de maturation. Les propriétés d'absorption, de perméation et de diffusivité sont dans l'ensemble peu modifiées induisant donc de faibles modifications du réseau poreux (volume total poreux, taille des pores, connectivité et tortuosité, capacité d'une espèce ionique à pénétrer dans le matériau). La faible modification du réseau poreux peut s'expliquer par la diminution de l'hétérogénéité des phases hydratées qui peut se rencontrer pour les matrices ayant subi des élévations de température. Le faible impact de la hausse de température sur les propriétés de transfert tendrait à confirmer les hypothèses faites sur les améliorations microstructurales avancées dans le chapitre 5 (§4.4).

Malgré le maintien des propriétés du béton incorporant du laitier aux états frais et durci (résistance et durabilité), le comportement de ce béton vis-à-vis du fluage reste relativement problématique avec une élévation de température lors de sa confection. Pour ce cas précis, il est donc essentiel de vérifier l'évolution des déformations différées et plus précisément les déformations de fluage. A terme, des déformations trop excessives peuvent causer un état au delà duquel ne sont plus satisfaites les conditions normales d'exploitation de l'élément. Avec l'utilisation de matrices ternaires (clinker + filler calcaire + laitier), les recommandations classiques lors d'un bétonnage par temps chaud sont à respecter avec rigueur : abaissement de la température initiale du béton, phase de prise qui coïncide avec les périodes les moins chaudes (coulage en début de soirée).

CONCLUSION GENERALE et PERSPECTIVES

L'objectif de cette étude était de caractériser les effets d'une température élevée (conditions de temps chaud) à la confection et au mûrissement sur un certain nombre de propriétés du BAP, dans le contexte de l'information relevée sur éprouvettes de contrôle réalisées à la livraison du béton sur chantier. Ce travail s'est inscrit en continuité de la thèse de doctorat de M. Mouret [MOU97] au sujet des baisses de résistances des bétons traditionnels vibrés confectionnés par temps chaud. Le programme expérimental a donc présenté les mêmes paramètres d'étude :

- la température initiale du mélange frais (20°C ou 50°C) ;
- les moyens de maintenir l'ouvrabilité (ajouts d'eau ou surdosage en superplastifiant) ;
- la température de conservation des éprouvettes durant les premières heures après le malaxage (20°C ou 35°C).

Les paramètres de composition étudiés ont été, quant à eux, plus spécifiques à l'utilisation des BAP et à l'évolution des comportements :

- nature et dosage en ciment (CEM I ou ciment au laitier CEM III/A) ;
- dosage de l'addition minérale (filler calcaire).

Le choix de ces paramètres de composition a conduit à l'étude de trois formulations :

- BAP1 (faible dosage en ciment CEM I et rapport massique filler/ciment=0,5) ;
- BAP 2 (rapport massique filler/ciment=0,25 à même teneur en poudre que BAP1),
- BAP 3 (liant ternaire CEM III + filler calcaire et à liant équivalent similaire à BAP2).

Les résultats obtenus lors de l'étude expérimentale amènent les conclusions suivantes :

- Il est possible de conserver les propriétés autoplaçantes à la fin du malaxage lorsque la température initiale du mélange s'accroît de 20°C à 50°C. Dans le cas de BAP1 et BAP2, des ajouts d'eau ou un surdosage en superplastifiant ont été nécessaires. Pour BAP 3 incorporant le ciment au laitier CEM III, la propriété autoplaçante est maintenue sans aucune action supplémentaire.
- L'élévation de la température initiale du mélange de 20°C à 50°C et ses conséquences sur le maintien de l'autoplaçance n'induit pas des variations significatives des teneurs en air et de l'eau réellement contenue dans les bétons incorporant le ciment CEM I (BAP1 et BAP2). En revanche, la même élévation de température provoque une diminution de l'eau et une augmentation de la teneur en air dans le béton incorporant le ciment CEM III (BAP3). La fixation moins importante de l'eau de gâchage favorise l'évaporation dans le cas de BAP3 incorporant un liant ternaire contenant moins de clinker que les bétons BAP1 et BAP2. Néanmoins, le maintien de l'autoplaçance dans le cas de BAP3 est dû à la

présence du superplastifiant. Ce dernier limite même les ajouts d'eau dans le cas de BAP1 et BAP2 incorporant un liant binaire (clinker+filler calcaire) à tel point qu'ils sont compensés par l'évaporation.

- L'élévation de la température initiale du béton de 20°C à 50°C favorise les résistances mécaniques à la compression à toutes les échéances étudiées (1j, 7j et 28j) pour BAP1 et BAP2, quels que soient les moyens de maintenir l'autoplaçance. Concernant BAP3, cette élévation de la température initiale n'induit pas de variation de résistance à toutes les échéances.
- L'élévation de la température de mûrissement durant les premières 24 heures (35°C durant les cinq premières heures après le malaxage) tend classiquement à augmenter les résistances à court terme (1j) mais le plus souvent à maintenir voire augmenter les résistances à plus long terme (7j et 28j) ; c'est un fait qui, dans le même contexte expérimental, n'était pas visible sur éprouvettes de bétons traditionnels vibrés. Néanmoins, l'effet délétère de la température de mûrissement élevée peut exister (BAP3 20-35), et maintient la justification de veiller à conserver à 20°C les éprouvettes durant les premières 24 heures.
- L'analyse de second niveau des résistances, prenant en compte la compacité et la maturité, montre le bénéfice à employer des matrices à forte teneur en filler calcaire (cas de BAP1). Les hypothèses avancées sur l'homogénéité acquise de la microstructure des BAP confectionnés et mûris à température de temps chaud, mettent en avant la synergie entre le filler calcaire et le superplastifiant afin de limiter la répartition non uniforme des hydrates, constatée dans le cas des bétons vibrés. L'utilisation du laitier de haut fourneau en tant qu'ajout au clinker limite les effets préjudiciables d'une température élevée sur la microstructure, même si sa réactivité est accrue en température.
- Les caractéristiques très similaires du réseau poreux entre les bétons de référence et les bétons confectionnés et mûris en température, quelle que soit la matrice employée (binaire ou ternaire), étayent l'action positive du couple synergique filler/superplastifiant sur l'homogénéité de la microstructure.
- Les recommandations liées au bétonnage par temps chaud doivent être considérées ; leur respect est indispensable car il permet de supprimer la déformation différée excessive enregistrée sur le béton BAP3 lorsqu'il est confectionné et mûri à température élevée.

Ce travail a permis de progresser sur la connaissance du comportement des BAP par temps chaud. Pour autant, dans la progression, de nombreuses interrogations naissent et concernent :

- la mise en solution des espèces ioniques en température élevée et en présence de superplastifiant ;
- l'impact du maintien d'ouvrabilité dans des périodes plus importantes (simulation d'agitation continue jusqu'à la livraison) sur les propriétés du matériau à l'état durci ;
- l'effet du filler en température lors de la phase de germination ;
- les cinétiques d'hydratation des matrices avec laitier en température ;
- l'influence de la température sur la structuration de l'interface pâte/granulat ;
- le rôle du superplastifiant, en relation avec les trois points qui viennent d'être cités.

Ce travail pourrait être transposé à des conditions de bétonnage par temps chaud et humide telles qu'elles existent au Vietnam. Il s'agirait là notamment d'apprécier l'impact des conditions de confection sur le maintien de l'autoplaçance et leurs effets sur les propriétés d'usage à l'état durci.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- [ABB98]: ABBAS A., « **Ecoulement gazeux des bétons partiellement saturés : Application à la mesure de perméabilité** », Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 1998.
- [ABB99]: ABBAS A., CARCASSES M., OLLIVIER J. P., « **Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation** », Materials and Structures, Vol.32, pp. 3-8, 1999.
- [ABD01]: ABDULLAH AL-ALMUSALLAM « **Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete** », Cement and Concrete Composites, Vol. 23, pp. 353-361, 2001.
- [ABD08]: AL-ABDULJABBAR A.H., “**Effect of time and temperature on workability of SCC**”, Source: <http://faculty.ksu.edu.sa/28745/DocLib/Hisham.SCC.pdf>
- [ACK03]: ACKER P. « **Sur les origines du retrait et du fluage du béton** » Revue française de Génie Civil (7), pp. 761-776, 2003.
- [AGG08]: AGGOUN A., YURTDAS I., BERTHET J. F., Li A., «**Influence de la température sur le comportement mécanique des bétons autoplacants**», Source : <http://laego.inpl-nancy.fr/fileadmin/AUGC08/Communications/BETONS%20AUTOPLACANTS/71-Aggoun-AUGC2008.pdf>
- [ALE72]: ALEXANDERSON J., «**Strength losses in heat cured concrete**», Swedish Cement and Concrete Institute, Vol. 43, 135p, 1972.
- [ALS94]: ALSAYED S. H., AMJAD M. A., «**Effect of curing conditions on strength, porosity, absorptivity and shrinkage of concrete in hot and dry climate**», Cement and Concrete Research, Vol. 24, 7, pp. 1390-1398, 1994
- [AMB05]: AMBROSIA D. M., LANGE A. D., BRINKS J. A., “**Restrained shrinkage and creep of Self Consolidating Concrete**”, [H-2-4a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.
- [ARB03]: ARBELAEZ JARAMILLO C.A., RIGUEIRA VICTOR J.W., MARTI VARGAS J.R., SERNA ROS P., PINTO BARBOSA M., “**Reduced models test for the characterization of the rheologic properties of self-compacting concrete (SCC)**”, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 240-250, 2003.
- [ASS04] : ASSIE S., “**Durabilité des bétons autoplacants**”, Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2004.
- [ASS05]: ASSIE S., ESCADEILLAS G., WALLER V., “**Self - Compacting and vibrated concrete compared by their physico – chemical durability properties**”, [P-2], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.

- [ATR03]: ATRUSHI D. S., "**Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete : Testing and Modelling**", Doctoral Thesis of The Norwegian University of Science and Technology Trondheim, Norway, 2003.
- [AUD07a]: AUDENAERT K., SCHUTTER G. D., "**Water vapour diffusion through SCC**", Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 683-688, 2007.
- [AUD07b]: AUDENAERT K., SCHUTTER G. D., "**Relation between vacuum water absorption and porosity of SCC**", Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 701-706, 2007.
- [AYE09]: AYED K., BENAÏSSA A., VIDAL T., PONS G., ABIDLAH A., "**Etude du comportement différé du BAP, l'influence de la pouzzolane naturelle de Benisaf sur le retrait du béton autoplaçant**", Proceedings of the 1th International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

B

- [BAB05]: BABU K.G., P. DINAKAR P., "**Design of SCC with fly ash**", [I-2-4a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.
- [BAE07]: BAERT G., BELIE N.B., SCHUTTER G.D., HOSTE S., « **Thermal analysis of cement fly ash pastes** », Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 583-588, 2007.
- [BAL99]: BALLIVY G., "**Relationship between ITZ transport properties and durability of cementitious composites**", Report 20: "**Engineering and transport properties of the Interfacial Transition Zone in cementitious composites** ", Rilem Publications, France, 1999.
- [BAR77]: BARRIOULET M., LEGRAND C., "Influence of the interstitial paste on the flow ability of fresh concrete - the importance of water retained by the aggregates", Materials and Structures, 10, pp.365-373, 1977.
- [BAR94]: BAROGHEL-BOUNY V., « **Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons: méthodes, analyses, interprétations** » Editions LCPC (Eds), Paris, France, 1994.
- [BAR93]: BARON J., BASCOUL A., ESCADEILLAS G., CHAUDOUARD G., « **From clinker to concrete – an overall modelling** », Materials and Structures, 26, pp. 319-327, 1993.
- [BAR96]: BARON J., OLLIVIER J.P., « **Les Bétons-Bases et données pour leur formulation** », éditions Eyrolles, 1996.

- [BAR03]: BARRITA F.de.J.C., BREMNER T.W., BALCOM B.J., “**Effects of curing temperature on moisture distribution, drying and water absorption in SCC**”, Magazine of Concrete Research, 55(6), pp. 517–524, 2003.
- [BAR07]: BARRITA F.de.J.C., BREMNER T.W., BALCOM B.J., LANGLEY W.S., “**Moisture distribution in drying ordinary and high performance concrete cured in a simulated hot dry climate**”, Materials and Structures, 37(8), pp. 522-531, 2007.
- [BAZ96]: BAZANT Z. P., KAPLAN M. F., “**Concrete at high temperatures, Material properties and mathematical models**“, Longman House, Burnt Mill, England, 1996.
- [BEN91]: BENTZ D. P., GARBOCZI E. J., “**Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone**”, ACI Material Journal (88-8), pp. 518-529, 1991.
- [BER92a]: “**The Behaviour of Concrete in Hot Climates**”, Materials and Structures, vol. 25, 147, pp. 157-162, 1992.
- [BER92b]: “**Effect of Evaporation of Water from Fresh Concrete in Hot Climates on the Properties of Concrete**”, Proc. of the third Int. Rilem Conf. on Concrete in Hot Climates, Torquay, edited by M. J. Walker, E&FN Spon, pp. 81-88, 1992.
- [BIE01]: BIEGOVIC D., MIKSIC B., MATUZIC S., “**New generation of a superplasticizer with synergetic effect**”, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 195-202, 2001.
- [BIL99]: BILLBERG P., “**Fine mortar rheology in mix design of SCC**”, Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, p47-58, 13-14 September 1999, Stockholm, Sweden.
- [BOE08]: BOEL V., AUDENERT K., SCHUTTER G.D., “**Gas permeability and capillary porosity of self-compacting concrete**”, Materials and Structures, 41, pp. 1283-1290, 2008.
- [BOE05]: BOEL V., AUDENERT K., SCHUTTER G.D., “**Experimental durability evaluation of SCC concrete with limestone filler**”, [A-3-1a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.
- [BOS07]: BOSILJKOV V.B., DAH D., ZARNIE R., “**Salt frost scaling of SCC related to curing regime and air void system**”, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 729-734, 2007.
- [BOU95]: BOUKHAROV G N, CHANDA M W, BOUKHAROV N G., “**The three processes of brittle crystalline rock creep**”, International Journal of Rock Mechanics, Mining Science & Geomechanics, vol. 32, n°4, pp. 325-335. 1995.

- [BRA03]: BRAMESHUBER W., UEBACHS S., **“The influence of the temperature on the rheological properties of SCC”**, Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Island, pp. 174-183, 2003.
- [BRU05]: BRUNNER M., **“Durability of SCC with high water content”**, [B-3-1a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.
- [BRU09]: BRUE F., **“Rôles de la température et de la composition sur le couplage Thermo – Hydro - Mécanique des bétons”**, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, octobre, 291p., 2009.
- [BUI94]: BUI V. K., **“A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete”**, MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1994.
- [BUI99]: BUI V. K., MONTGOMERY D., **“Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone”**, 1st International RILEM Symposium on SCC, p227-238, 13-14 September 1999, Stockholm.
- [BUR96]: BURG R. G., **“The influence of Casting and Curing Temperature on the Properties of Fresh and Hardened Concrete”**, Research and Development Bulletin RD113T, Portland Cement Association, 1996.

C

- [CAB00]: CABRERA J., ROJAS M. F., **“Mechanism of hydration of metakaolin-lime-water system”** Cement and Concrete Research 31(4), pp 177-182, 2000.
- [CAS07]: CASSAGNABERE F., **“Produits préfabriqués en béton filé: vers l’amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production”**, Thèse de doctorat de l’Université Paul Sabatier, 2007.
- [CAS09]: CASSAGNABERE F., MOURET M., ESCADEILLAS G., **“Early hydration of clinker-slag-metakaolin combination in steam curing conditions, relation with mechanical properties”**, CCR (39), pp 1164-1173, 2009.
- [CHA00]: CHATELIER H. L., **“Sur les changements volumiques qui accompagnent le durcissement des bétons”**, Bulletin de la société de l’encouragement pour l’industrie nationale, 5ème série, tome 5, pp 54-57, 1900.
- [CHA10]: CHAID R., JAUBERTHIE R., BOUKHALED A., **“Effet de l’ajout calcaire sur la durabilité des bétons”**, Lebanese science journal, Vol 11-1, pp 91-103, 2010.
- [CHA13]: EL-CHABIB H., IBRAHIM A., **« The performance of high-strength flowable concrete made with binary, ternary, or quaternary binder in hot climate”**, Construction and Building Materials, 47, pp. 245-253, 2013.

- [CHE93]: CHEN R., WANG M. L., “ **A partitioned solution method with moving boundaries for nonlocal creep damage of concrete**”, Proceeding of the Fifth International RILEM Symposium CONCREEP 5, Ed. E & FN Spon, pp. 393-398, 1993.
- [CHO03]: CHOPIN D., FRANCY O., LEBOURGEOIS S., ROUGEAU P., “**Creep and shrinkage of heat-cured SCC**”, Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 672-683, 2003.
- [CHO06]: CHOINSKA M., « **Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure** », Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nante et l'Université de Nantes, 2006.
- [CLA92]: CLARK B. A., DRAPPER E. A., LEE R. J., SKALNY J., BEN BASSAT M., « **Electron-optical evaluation of concrete cured at elevated temperature**», Proceeding of International Symposium How to produce durable concrete in hot climates, ACI, pp. 41-60, 1992.
- [COL05]: COLLEPARDI M., “**Admixtures - Enhancing Concrete Performance**”, Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, on 6 July 2005, Published by Thomas Telford Publishing.
- [CRA10a] : CRAEYE B., SCHUTTER G. D., AREIAS L., WACQUIER W., HUMBEEK H. V., COTTHEM A. V., “**Validation of the Early – Age Thermo Mechanical Behaviour of SCC Supercontainers for the Disposal of High Level Radioactive Waste**”, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 851-861, 2010.
- [CRA10b] : CRAEYE B., De SCHUTTER G., DESMET B., VANTOMME J., HEIRMAN G., VANDEWALLE L., CIZER O., AGGOUN S., KADRI E.H., “**Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete**”, Cement and Concrete Research, Volume 40, pp. 908-913, 2010.
- [CYR03]: CYR M., MOURET M., “**Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures : Consequences on Self-Compacting Concrete design**”, Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Allemagne, pp. 241-255, 2003.

D

- [DAS05]: DAS M., BANDYOPADHYAY S. N., “**Effect of hydration on fresh self compacting concrete: From macrostructure to microstructure analysis**”, [G-1-5a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.

- [DET91]: DETWILER R. J., KJELSELL K. O., GJORV O. E., “**Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures**”, ACI Materials Journal, volume 88, issue 1, pp. 19-24, 1991.
- [DIE10]: DIEDERICH P., “**Contribution à l’étude de l’influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton** », Thèse de doctorat de l’Université Paul Sabatier, 2010.
- [DIE13]: DIEDERICH P., BUCHER R., MOURET M., CYR M., ESCADEILLAS G., “**Rational use of flash metakaolin applied to Industrial design of self-compacting concrete**”, in N. Roussel and H. Bessaies (eds), Proceedings PRO90 of the 7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and the 1st Conference on Rheology and Processing of Construction Materials, Paris, 2-4 september 2013, pp.83-90, RILEM publications, Bagneux, France.
- [DIV05]: DIVET L., “**Présentation des techniques de diagnostic de l’état d’un béton soumis à un incendie**”, Techniques et méthodes des Laboratoires des Pont et Chaussées , pp. 114, 2005.
- [DOM07]: DOMONE P. L., “**A review of the hardened mechanical properties of SCC**”, Cement and Concrete Composites, Volume 29, Issue 1, pp. 1-12, 2007.
- [DON11]: DONG W. R., WONKO J., NOGUCHI T., “**Effects of simulated environmental conditions on the internal relative humidity and relative moisture content distribution of exposed concrete**”, Cement and Concrete Composites, Volume 33, Issue 1, pp. 142-153, 01/2011.
- [DUP95]: DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J. C., « **Granulats, sols ciments et bétons** », éditions Casteilla, Paris, 1995.

E

- [ELB05]: EL BARRAK M., «**Contribution à l’étude de l’aptitude à l’écoulement des bétons autoplaçants à l’état frais** », Thèse de doctorat de l’Université Paul Sabatier, 2005.
- [ELK09]: ELKHADIRI A., PALACIOS M., PUERTAS F., “**Effect of curing temperature on cement hydration**”, Ceramics Silikaty, 53, 2, pp. 65-75, 2009.
- [ERK05]: ERKMEN B., « **Development of Self – Consolidating Concrete for Bridge Girders and Evaluation of Its Fresh Properties** », Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2005.
- [ESC88]: ESCADEILLAS G., « **Les ciments aux fillers calcaires : Contribution à leur optimisation par l’étude des propriétés mécaniques et physiques des bétons fillerisés** », Thèse de doctorat de l’INSA Toulouse, 1988.

F

- [FAR09]: FARES H., « **Propriété mécaniques et physico – chimie de bétons autoplacants exposés à une température élevée** », Thèse de doctorat de l'Université de Cergy Pontoise, 2009.
- [FASC13]: « **Exécution des ouvrages de génie civil en béton** »; Cahier des clauses techniques générales, 2013.
- [FEB05]: « **Le bétons autoplacants** », Bulletin publié par FEBELCEM (Belgique). Source : http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/fr/36_fr.pdf
- [F.I.P, 86]: Fédération Internationale de la Précontrainte « **Concrete Construction in Hot Weather** », FIP Guide to Good Practice, London, Thomas Telford, 16 p., 1986.
- [FLA01]: FLATT R J., HOUST Y F « **A Simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers** », Cement and Concrete Research, vol. 31, p. 1169–1176, 2001

G

- [GALL00]: GALLIAS J. L., KARA-ALI R., BIGAS J. P., « **The effect of fine mineral admixtures on water on requirement of ciment pates** », Cement and Concrete research, 30, 10, pp. 1543-1549, 2000.
- [GAL06]: GALLUCCI E., XINYU ZHANG., SCRIVENER K., « **Influence de la température sur le développement microstructural des bétons** », Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)² B, Toulouse, France, 19-20 juin 2006.
- [GAL10]: GALEOTAI D., GIAMMATTEOI M.M., GREGORI A., MANFREDI G., R. MARINO R., VIVALDI S., « **SCC for Rapid Home Construction after a Natural Disaster in Italy** », Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 1369-1371, 2010.
- [GET93]: GETTU R., GARCIA-ALVAREZ V O., « **Interaction of creep and fracture in concrete** », Proceeding of the Fifth International RILEM Symposium CONCREEP 5, Ed. E & FN Spon, pp. 413-420, 1993.
- [GHA10]: GHAFOORI N., DIAWARA H., « **Influence of temperature on fresh performance of self – consolidating concrete** », Construction and Building Materials, 24, pp. 946-955, 2010.
- [GIB99]: GIBBS J.C., ZHU W., « **Strength of hardened self-compacting concrete** », Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 septembre 1999.

- [GIR10]: GIRISH S., MALLIKARJUN G. N.,” **Influence of Volume of Paste on the Fresh and Hardened Properties of SCC using Recycled Aggregates** “, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 275-284, 2010.
- [GRU07]: GRUNEWALD S., WALRAVEN J. C.,” **Characteristics and influence of paste on the behavior of self-compacting concrete in the fresh state** “, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 3-5 September 2007, Ghent, Belgium.

H

- [HAM81] HAMPTON J. S., “**Extended Workability of Concrete Containing High-Range Water-Reducing Admixtures in Hot Weather, In Development in the Use of Superplasticizers**”. ACI Spec. Publ. SP 68, Detroit, 1981, pp. 409-22.
- [HAR10]: HARBOUR J. R., EDWARDS T. B and WILLIAM V. J., “**Impact of Curing Temperature on the Performance Properties of Saltstone Mixtures**”, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 833-840, 2010.
- [HAY95]: HAYAKAWA M., MATSUOKA Y., YOKOTA K., “**Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan**”, Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397, 1995.
- [HBI01]: HIBINO M., MORITA K., MARUYAMA K., “**Effect of surface moisture of sand on fluidity of fresh mortar**”, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, pp. 537-544, 2001.
- [HOL05]: “**Le béton autocompactant**”, Recommandation éditée par Holcim (Suisse) SA. Source: http://www.hcb.ch/holcimcms/uploads/CH/scc_productinfo_F0.pdf
- [HSU63]: HSU T. T. C., SLATE F. O., «**Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar**», Proc. Of the Journal of the American Concrete Institute, vol. 60, 4, pp. 465-486.
- [HU95]: HU C., «**Rhéologie des bétons fluides**», Etudes de Recherches des Laboratoires Ponts et Chaussées, OA 16, 203p., Paris, France, 1995.
- [HU98]: HU C. et BARBIERI B., «**Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d’un béton fluide traditionnel**», Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265-272, 1^{ère} Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998.

[HUS91]: HUSSON S., «**Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-filler. Application aux mortiers** », Thèse de doctorat de INP Grenoble et ENSM de St Etienne, 1991.

I

[ICAR]: “**Aggregates in SCC**”, Research report ICAR 108-2F, Sponsored by the Aggregates Foundation for Technology, Research and Education.

[ITT10]: ITTERBEECK P.V., N. CAUBERG N., PARMENTIER B., VANDEWALLE L., LESAGE K., “**Evaluation of the Cracking Potential of Young Self- Compacting Concrete**”, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 991-1001, 2010.

J

[JAL95]: JALALI S., ABYANEH M. Y., “**Prediction of final concrete strength in hot climates**”, Magazine of Concrete Research, (47-173), pp. 291-297, 1995.

K

[KAN03]: KANSTAD T., HAMMER T.A., BJONTEGAARD O., SELLEVOLD E.J., “**Mechanical properties of young concrete: Part I: Experimental results related to test methods and temperature effects**”, Materials and Structures, Volume 36, May 2003, Number 4, pp. 218-225.

[KAS05]: KASZYNSKA M., “**Early age properties of SCC**”, [H-2-2a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.

[KAZ01]: KAZIRUKANYO J.B., TENOUTASSE N., “**The adsorption isotherms of sulfonated naphthalene formaldehyde (SNF) on portland cement hydration products and its effect on the hydration kinetics of clinker minerals at high dosages**”, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 203-212, 2001.

[KIM02]: KIM K. J., SANG H. H., YOUNG C. S., “**Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete. Part I. Experimental results**”, Cement and Concrete Research 32, 1087-1094, 2002.

[KJE90a]: KJELSEN K. O., DETWILER R. J., GJW O. E., “**Pore Structure of Plain Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures**”, Cement and Concrete Research, Volume 20, No. 6, pp. 927-933, 1990.

- [KJE90b]: KJELLSSEN K. O., DETWILER R. J., GJW O. E., "**Backscattered Electron Imaging of Cement Pastes Hydrated at Different Temperature**" Cement and Concrete Research, Volume 20, No. 21, pp. 308-311, 1990.
- [KJE87]: KJELLSSEN K. O., "**Mathematical modelling of cement hydration**" in seminar on hydration of cement, Copenhagen, Aalborg Portland ed., 11p, 1987.
- [KJE96]: KJELLSSEN K. O., "**Heat curing and post heating curing regimes of high performance concrete: Influence on microstructure and C-S-H composition**" Cement and Concrete Research, Volume 26(2), pp. 295-307, 1996.
- [KLI58]: KLIEGER P., "**Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength**", J. Amer. Concr. Inst., Volume 54, pp. 1063-1081, 1958.
- [KUE07]: KUEHNE H. C., SCHMIDT W., MERG .B., "**The influence of temperature on SCC in presence of superplasticizer and additional admixtures**", Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 405-410, 2007.

L

- [LAD10]: LADAOUÏ W., « **Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro-Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs** », Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, 2010.
- [LAN97]: LANGE F., MORTE H., RUDERT V., "**Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties**", Cement and Concrete Research, 27 (10), pp. 1481-1488, 1997.
- [LAR00]: de LARRARD F., "**Structures granulaires et formulation des bétons**", Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA34, Paris, 2000.
- [LAU10]: LAUTEN R.A., "**Delayed addition of plasticizer, effect on cement hydration and paste rheology**", Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 329-343, 2010.
- [LAW03]: LAWRENCE P., CYR M., RINGOT E., "**Mineral admixtures in mortars - Effect of inert materials on short-term hydration**", Cement and Concrete Research, 33, pp. 1939-1947, 2003.
- [LIO05]: LION M., SKOCZYLAS F., LAFHAJ Z., SERSAR M., "**Experimental study on a mortar. Temperature effects on porosity and permeability. Residual properties or direct measurements under temperature**", Cement and Concrete Research, 35, pp. 1937-1942, 2005.

- [LIU06]: LIU X., **“Microstructural investigation of self-compacting concrete and highperformance concrete during hydration and after exposure to high temperature”**.
Thèse de doctorat, Université de Ghent, Belgique, 2006.
- [LUI07]: LUI YANJUN., **« Strength, Modulus of elasticity, Shrinkage and Creep of Concrete»**,
Thèse de doctorat de l'Université de Florida, 2007.
- [LUR01]: LURA P., BREUGEL K. V., MARUYAMA I., **“Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete ”**, Cement and Concrete Research, 31, pp. 1867-1872, 2001.

M

- [MAI10]: MAIA L., FIGUEIRAS J., **“Deformation of High Strength SCC for Early Age Loading”**, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 961-970, 2010.
- [MAH07]: MAHOUTIAN M., YADEGARAN I., LIBRE N.A., **”Comparison between different test”** Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 103-109, 2007.
- [MAM89]: MAMILLAN, MINARD, ZANGHELLINI., **”Bétonnage par temps chaud. Connaissances actuelles et recommandations”**, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et de Travaux publics, n°474, pp. 78-119, 1989.
- [MAR10]: MARTINI S. AL., NEHDI M., **«Effects of heat and mixing time on SCC”**, Proceeding of the ICE - Construction Materials, Volume 163, Issue 3, May 2010 , pages 175 –182 , ISSN: 1747-650X, E-ISSN: 1747-6518, 2010.
- [MAS94]: MASSES S., ZANNI H., LECOURTIER J., ROUSSEL J C., RIVEREAU A., **«²⁹Si solid state NMR study of tricalcium silicate and cement hydration at high temperature”**, dans “The application of NMR spectrometry to cement science”, COLOMBET P., GRIMMER A R., pp.249-257, 1994.
- [MAT10]: MATINI S. A., NEHDI M., **« Rheology of superplasticizer cement paste and concrete subjected to high temperature and prolonged mixing time”**, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 461-469, 2010.
- [MEH93]: MEHTA P. K. Monteiro **« Concrete : Structure, properties, and materials »** Prentice Hall, Engle wood cliff, 1993.
- [MIK08]: MIKANOVIC N., JOLICOEUR C., **“Influence of superplasticizers on the rheology and stability of limestone and cement pastes”**, Cement and Concrete Research 38, p907–919, 2008.

- [MIK10]: MIKANOVIC N., ROUIS F., KHAYAT K.H., **“Influence of Supplementary Cementitious Materials and Fillers on Rheological Properties, Kinetics of Cement Hydration, and Compressive Strength of Concrete-Equivalent Mortar of SCC consistency”**, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 381-394, 2010.
- [MNA08]: MNAMNAHONCAKOVA E., PAVLIKOVA M., GRZESZCZYK S., **“Hydric, thermal and mechanical properties of SCC containing different fillers”**, *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 7, pp. 1594-1600, 2008.
- [MOI10]: MOISIADIS S., PAPAYIANNI I., **“Influence of SAP(s) on Water Release and Early Deformation of SCC mixtures”**, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 303-308, 2010.
- [MOO87]: **“Hot Weather Concreting: tips for Builders”**, *Concrete International*, vol. 9, 5, pp. 63-64, 1987.
- [MOR01]: MORTSELL E., Norbetong AS., RODUM E., **“Mechanical and durability aspects of SCC for road structures”**, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 459-467, 2001.
- [MOU09]: MOUSSA B. H., **“Influence de la température sur la thixotropie des bétons autoplaçants”** Thèse de doctorat de de l’Université d’Artois, 2009.
- [MOU97]: MOURET M., **“Contribution à l’étude des phénomènes d’altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud”** Thèse de doctorat de l’Université Paul Sabatier, 1997.
- [MOU99]: MOURET M., BASCOUL A. ESCADEILLAS G., **“Microstructural features of concrete in relation to initial temperature-SEM and ESEM characterization”**, *Cement and Concrete Research* 29, pp.369-375, 1999.
- [MOU03]: MOURET M., BASCOUL A., ESCADEILLAS G., **“Strength impairment of concrete mixed in hot weather: relation to porosity of bulk fresh concrete paste and maturity”** *Magazin of Concrete Research*, Vol. 55, 3, pp. 215-223, 2005.
- [MOU05]: MOURET M., BASCOUL A., ESCADEILLAS G., **“Strength impairment of concrete mixed in hot weather: analysis in relation to physical and chemical properties of hardened concrete”** *Magazine of Concrete Research*, Vol. 57, 5, pp. 301-308, 2005.

N

- [NAG95]: NAGATAKI S., FUJIWARA H., **“Self compacting property of highly flowable concrete”**, Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301-314, 1995.

- [NAN10]: NANTHAGOPALAN P., SANTHANAM M., **“A Simple and Systematic Mix Design Procedure for Self-Compacting Concrete”**, 6th International RILEM Symposium on SCC, p54-63, 26-29 September 2010, Montreal, Canada.
- [NEH98]: NEHDI M., MINDESS S., AITCIN P. C., **“Rheology of high-performance concrete: Effect of ultrafine particles”**, Cement and Concrete Research, 28, 5, pp. 68-697, 1998.
- [NEV00]: NEVILLE A. M., **“Propriétés des Bétons”**, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.
- [NEV86]: NEVILLE A. M., **“Propriétés des Bétons”**, third edition, Longman Scientific & Technical, UK.
- [NIC08]: NICOT P., **« Interactions mortier-support: éléments déterminants des performances et de l’adhérence d’un mortier »**, Thèse de doctorat à l’Université Paul Sabatier – Toulouse III, octobre 2008.
- [NON99]: NONNET E., LEQUEUX N., BOCH P., **«Elastic properties of high alumina cement castables from room temperature to 1600 °C»**, J. Eur. Ceram. Soc. 19, pp. 1575-1583, 1999.
- [NOU95]: NOUMOWE A., **“Effet de hautes températures (20-600 °C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performance”**, Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 1995.
- [NUR64]: NURSE R. W., **“Principes physiques et chimiques et méthode de durcissement accéléré du béton ”**, dans Association Française de Recherche et d’Essais sur les Matériaux et les Constructions (Eyrolles), Moscou (URSS), pp7-18, 1964.

O

- [OHN01]: OHNO A., EDAMATY Y., SUGAMATA T., OUCHI M., **“The mechanism of time dependance for fluidity of high blite cement mortar containing polycarbonxylate – based superplasticizer”**, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 169-178, 2001.
- [OKA95]: OKAMURA H., OZAWA K., **“Mix design method for self-compacting concrete”**, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers 24.8 (496), 1995.
- [OKA03]: OKAMURA H., OUCHI M., **“Self-compacting Concrete”**, Journal of advanced concrete technology, vol 1, p5-15, 2003.
- [OLD87]: OLDER I., ABDUL-MAULA S., ZONGHYA L., **“Effect of hydration temperature on cement paste structure”**, MRS Symposium, (85), p138-144, 1987.
- [OLL81]: OLLIVIER J. P., **“Contribution à l’étude de l’hydratation de la pâte de ciment portland au voisinage des granulats”**, Thèse de doctorat de l’Université Paul Sabatier de Toulouse, 1981.

- [ORR71]: ORR D. M. P., « **A factorial experiment to investigate the effects of cement temperature and initial mix temperature on the consistency and 28-day strength of concrete** », Proc. of second Rilem Int. Symp. on Concrete and Reinforced Concrete in Hot Countries, Haïfa, vol. I, pp. 1-22.
- [ORT05]: ORTIZ J., AGULLO A., GARCIA T., « **Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions** », Cement and Concrete Research, 35(10), pp. 1970-1979, 2005.
- [OZA92]: OZAWA K., TANGTERMSIRIKUL S., MAEKAWA K., « **Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete** », Proceeding of the 4th CANMET/ACI Conference on fly Ash, Silica Fume and natural Pozzolans in concrete, p121-137, Istanbul, 1992

P

- [PCA97]: « **Portland Cement, Concrete and Heat of Hydration** », Concrete Technology Today - Portland Cement Association (PCA). Volume 18/ Number 2/ 07-1997.
- [PER99]: PERSSON B., « **Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete** », Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 239-250, 13-15 septembre 1999.
- [PER01]: PERSSON B., « **A comparison between mechanical properties of SCC and the corresponding properties of normal concrete** », Cement and Concrete Research, 31(2), pp. 193-198, 2001.
- [PER04a]: PERSSON B., « **Chloride migration coefficient of self-compacting concrete** », Materials and Structures, Vol. 37, pp. 82-91, 2004.
- [PER04b]: PERCHE F., « **Adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments** », Thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2004.
- [PET96]: PETERSSON Ö., BILLBERG P., VAN B K., « **A model for Self-Compacting Concrete** », International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, 1996.
- [PET05]: PETIT J. Y., « **Effet de la température, des superplastifiants et des ajouts sur les variations rhéologiques des micromortiers et bétons autoplacants** », Thèse de doctorat de l'Université de Sherbrooke, Canada, 2005.
- [PET07]: PETIT J. Y., WIRQUIN E., KHAYAT K. H., WANH Y., « **Coupled effect of temperature and superplasticizer on rheological properties of SCC mortar** », Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 1099-1104, 2007.

- [PIH72]: PIHLLAJAVAARA S., **“Effect of temperature on strength of concrete”**, ACI Special Publication (34), pp.347-434, Detroit, 1972.
- [PLA02]: PLATRET G., **“Suivi de l’hydratation du ciment et de l’évolution des phases solides dans les bétons par analyse thermique, caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons. Méthode de mesure et d’essai de laboratoire”**, In Méthode d’essai N°58, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2002.
- [PAT95]: PATEL H. H., BLAND C. H., POOL A. B., **“The microstructural of concrete cured at elevated temperature”**, CCR 25(3), pp. 485-490, 1995.
- [POH98]: POH K. W **“General creep-time equation”**, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 10, n° 2 , pp. 118-120, 1998.
- [PON03]: PONS G., PROUST E. and ASSIE S., **“Creep and shrinkage of self compacting concrete: a different behavior compared with vibrated concrete?”**, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.
- [POP03]: POPPE A. M., SCHUTTER G. D., **“Effect of limestone filler on the cement hydration in SCC”**, Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 558-566, 2003.
- [POP05]: POPPE A. M., De SCHUTTER G., **“Modelling of heat development during cement hydration in SCC”**, [P-12], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.
- [PRO02]: PROUST E., **« Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés »**, Thèse de doctorat de l’INSA de Toulouse, 2002.
- [PRO05]: PROSKE T., GRAUBNER C. A., **“Influence of the coarse aggregates on the concrete properties of SCC”**, [B-2-1a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.

R

- [RAM88]: RAMEZANIANPOUR A., CABRERA J. G., **“The effect of curing condition on the mortars containing cement, fly ash and silica fume ”**, 2nd Inter Sem on Cement and Building Materials (4), pp. 181-188, 1988.
- [REI03]: REINHARDT H. W., JOOSS M., **“Permeability and diffusivity of SCC as function of temperature”**, Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 808-817, 2003.
- [REI06]: REINHARDT H. W., STEGMAIER M., **“Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of SCC”**, Cement and Concrete Research, 36(5), pp. 879-885, 2006.

- [RIG05]: RIGUEIRA J., BONILLA M., TAENGUA E., PAYA J., SERNA P., “**Physicochemical characterization and effectiveness of additives used on SCC**”, [B-1-5a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005
- [ROZ07]: ROZIERE E., GRANGER S., TURCRY Ph., LOUKILI A., “**Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self - compacting concrete**”, Cement and Concrete Composites, Volume 29, pp. 626-636, 2007.

S

- [SAA01]: SAAK A. W., JENNINGS H. M., SHAH S. P., “**New methodology for designing self-compacting concrete**”, ACI Material Journal, 98, 6, 429-439, 2001.
- [SCH03]: SCHUITMAKER E. J., BREUGEL K. V., Den UIJL J. A., ”**Design of self – compacting lightweight concrete with environment – friendly lightweight aggregate**”, Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 725-731, 2003.
- [SCH04a]: SCHLUMPF J., ”**Self-compacting concrete structures in Switzerland**”, Tunnelling and Underground Space Technology, 19 (2004) 480.
- [SCH04b]: SCHINDLER A.K., “**Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials**”, ACI Materials Journal, 101(1), pp. 72-81, 2004.
- [SCH07a]: SCHMIDT.K., GRUNDMANN G., HEINZ D., “**Effect of mineral additions on prevention of alkali silica reaction in SCC – effect of mix design on damage**”, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 753-760, 2007.
- [SCH07b]: SCHMIDT W., Jos BROUWERS J., KIIHNE H.C., Birgit MENG B., “**Effects of Superplasticizer and Viscosity – Modifying Agent on Fresh Concrete Performance of SCC at Varied Ambient Temperature**”, Design, Production and Placement of Self – Consolidating Concrete, RILEM Bookseries, Volume 1, Part 2, pp. 65-77, DOI: 10.1007/978-90-481-9664-7_6.
- [SCH99]: SCHERER G. W., “**Structure and properties of gel**”, Cement and Concrete Research, n°29; pp. 1149-1157; 1999.
- [SCR92]: SCRIVENER K. L., “**The effect of heat treatment on inner product C-S-H**”, Cement and Concrete Research, 22(6), pp. 1224-1226, 1992.
- [SED99]: SEDRAN T., « **Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants** », thèse de l’ENPC, 1999.

- [SIV10]: SIVARAJA M., “**SCC under Elevated Temperature**”, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 917-928, 2010.
- [SHA78]: SHALON R., “**Report on Behaviour of Concrete in hot climate Part I**”, Materials and Structures, Volume 13, Number 3, pp. 127-131, DOI: 10.1007/BF02473565.
- [SHA80]: SHALON R., “**Report on Behaviour of Concrete in hot climate Part II**”, Materials and Structures, Volume 13, Number 3, pp. 255-264, DOI: 10.1007/BF02473565.
- [SHK93]: SHKOUKANI H., WALRAVEN J. C., “**Creep and relaxation of concrete subjected to imposed thermal deformations**”, Proceedings of the 5 International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete, Barcelona, E.& FN Spon, London, 1993.
- [SKA00]: SKARENDAHL A., PETERSSON O., “**Self-compacting concrete**”, State of the art report of RILEM technical committee 174-SCC, 2000
- [SON01]: SONG H. W., BYUN K. J., KIM S. H., “**Early – Age creep and shrinkage in SCC incorporating GGBFS**”, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 413-422, 2001.
- [SON05]: SONEBI M., “**Performance and durability of SCC using ground granulated blast furnace slag in hot climate**”, [P-13], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.
- [SON99]: SONEBI M., BARTOS P. J. M., “**Hardened SCC and its bond with reinforcement**”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 september 1999.
- [SOR93]: SOROKA, I., 1993, “**Concrete in Hot Environments**”, E & FN Spon, UK.
- [STE05]: STEGMAIER M., “**Heat curing of self-compacting concrete**”, Otto-Graf-Journal, Vol. 16, 2005.
- [SU01]: SU N., HSU K. C., CHAI H. W., “**A simple mix design method for self-compacting concrete**”, Cement and concrete Research, 31, 12, 1799-1807, 2001.
- [SUK05]: SUKSAWANG N., NASSIF H. H., “**Durability of SCC with pozzolan materials**”, [A-3-2a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 octobre - 2 novembre 2005.

T

- [TAN95]: TANGTERMSIRIKUL S., BUI V. K., “**Blocking criteria for the aggregate phase of self-compacting high performance concrete**”, Proceeding of the Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Thailand, p58-69, December 1995, Bangkok.
- [TAP62]: TAPLIN J. H., “**The temperature dependence of the hydration rate of Portland cement paste**”, Australian Journal of Applied Science, 13(2), pp. 164-171, 1962.

- [TAY87]: TAYLOR T., “**Reaction of tricalcium silicate paste with organic liquids**”, Cement and Concrete Research, 17, pp 613-623, 1987.
- [TRA99]: TRÄGARDH J., “**Microstructural features and related properties of self-compacting concrete**”, in Skarendahl and O. Petersson (eds), Proceedings PRO7 of the 1st international RILEM symposium on SCC, Stockholm, 13-14 september 1999, pp. 175-186, RILEM publications, Cachan, France.
- [TUR04]: TURCRY P., « **Retraits et fissuration des bétons autoplaçants influence de la formulation** », Thèse de doctorat de l’Université de Nantes, 2004.

U

- [ULM98]: ULM F. J. ACKER P. « **Le point sur le fluage et la recouvrance des bétons** » Bulletin du Laboratoire des Ponts et Chaussées, Spécial XX, pp73-82, 1998.
- [ULM99]: ULM F. J., Le MAOU F., BOULAY C., « **Creep and shrinkage couplings : new review of some evidence** » Revue Française de Génie Civil, Ed Hermès, pp21-37, 1999.
- [UTS07]: UTSI S., JONASSON J. E., “**Evaluation of the risk for early thermal cracking in SCC**”, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 545-551, 2007.

V

- [VAG07]: VAGT C., WALLIN K., TRAGARDH J., JONASSON J. E., “**Comparison of heat development and thermal crack risk between SCC and conventional concretes in Civil engineering construction**”, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, pp. 565-570, 2007.
- [VAL12]: VALCUENDE M., et al “**Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete**”, Cement and Concrete Research, 2012, DOI:10.1016/j.cemconres.2012.01.001.
- [VEN77]: “**Le Bétonnage par temps chaud** », Le Moniteur, n°31 (août 1977), pp. 57-59.
- [VER68]: VERBECK G. J., HELMUTH R. H., “**Structure and physical properties of cement paste** », in Cement Association of Japan (editor), Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo (Japan), pp. 1-32, 1968.

W

- [WAL05]: WALLER V., HADDAD O., NACHBAUN L., “**Estimating SCC early ages strength through simple test**”, [H-1-2a], SCC 2005, Chicago, USA, 30 October - 2 November 2005.

- [WAH97]: WAHEEB A. AL-KHAJA., **"Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes"**, Construction and Building Materials, Vol 11, 1, pp. 9-13, 1997.
- [WEI10]: WEISHEIT S., WALDMANN N., REGER A., **„Influence of environmental conditions on the rheological properties of SCC"**, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal, Canada, pp. 453-460, 2010.
- [WON08]: WONG H. H. C, KWAN A. K. H, **"Packing density of cementitious materials: part 1- measurement using a wet packing method"**, Materials and Structures, 41, pp. 689-701, 2008.

Y

- [YAM01]: YAMADA K., OGAMA S., TAKAHASHI T., **"Improvement of the compatibility between cement and superplasticizer by optimizing the chemical structure of the polycarboxylate - type superplasticizer"**, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 159-168, 2001.
- [YAM07]: YAMMINE J., **« Rhéologie des bétons fluides à hautes performances relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico – chimie et propriétés mécaniques »**, Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2007.
- [YAH05]: YAHIA A., TANIMURA M., SHIMOYAMA Y., **"Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio"**, Cement and concrete Research, 35, 3, pp. 532-539, 2005.
- [YAZ05]: YAZAN KAZIM., **"Effects of retempering with superplasticizer on properties of prolonged mixed mineral admixture containing concrete at hot weather conditions"**, Thèse de doctorat de Université de Middle East Technique, 2005.
- [YE07a]: YE G., De SCHUTTER G., et TAERWE L., **"Spalling behaviour of small self-compacting concrete slabs under standard fire conditions"**, Proceeding of 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete SCC 2007, 54, pp.799 - 804, 2007.
- [YE07b]: YE G., LIU X., De SCHUTTER G., TAERWE L., and VANDEVELDE P., **"Phase distribution and microstructural changes of self-compacting concrete paste at elevated temperature"**, Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 978 - 987, 2007.
- [YID05]: YIDIRIM H., PEKMEZCI B. Y., AKMAN M. S., **"Effects of soluble alkalis of cement on fresh and hardened properties of SCC"**, SCC 2005, Chicago, USA, 30 October - 2 November 2005.

Z

- [ZHA00]: ZHANG X., HAN J., "**The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste**", Cement and Concrete Research, 30, 5, pp. 827-830, 2000.
- [ZHA12]: ZHAO H., SUN W., WU X., GAO B., "**Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete**", Materials and design, 35, pp. 194-200, 2012.
- [ZHO01]: ZHOU Q., GLASSER F. P., "**Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at < 120 °C**", Cement and Concrete Research, 31, pp. 1333-1339, 2001.
- [ZHU01]: ZHU W., QUINN J., BARTOS P.J.M., "**Transport properties and durability of self-compacting concrete**", Proceedings of 2nd International Symposium on Self Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 451-458, 23-25 october 2001.

Textes normatifs et recommandations

- [ACI93]: "**Durable Concrete in Hot Climates**", American Concrete Institute Committee 201, Edited by MACLNNIS C.
- [ACI 305, 1991]: « **Hot Weather Concreting** », Journal of American Concrete Institute, vol. 88, 4, pp. 417-436.
- [ACI 305, 2010]: « **Guide to Hot Weather Concreting** », Reported by ACI Committee 305 of American Concrete Institute, 28p, October 2010.
- [AFGC00]: Recommandations provisoires de l'Association Française de Génie Civil, « **Bétons autoplaçants** », éd. AFGC, 2000.
- [AFPC97]: AFPC-AFREM, « **Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité** », Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM «Durabilité des bétons », Toulouse, 1997.
- [NF EN 12350-6]: **Essai pour béton frais - Partie 6: « Masse volumique »**, décembre 1999.
- [NF EN 12350-7]: **Essais pour béton frais - Partie 7: « Teneur en air - Méthode de la compressibilité »**, Mars 2001.
- [NF EN 12350-8]: **Essai pour béton frais - Partie 8: « Béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams »**, Novembre 2010.
- [NF EN 12350-10]: **Essai pour béton frais - Partie 10: « Béton autoplaçant - Essai à la boîte en L »**, Novembre 2010.
- [NF EN 12350-11]: **Essai pour béton frais - Partie 11: « Béton autoplaçant - Essai de stabilité au tamis »**, Novembre 2010.

- [EN 197-1]: **Ciment - Partie 1 : « Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants »**, février 2001.
- [EN 206-1]: **Béton - Partie 1 : « Spécification, performances, production et conformité »**, avril 2004.
- [NF EN 206-9]: **Béton, Partie 9: « Règles complémentaires pour le béton autoplaçant »**, juin 2010.
- [NF EN 12390-3]: **NORME FRANÇAISE NF P 18-455 « Partie 3 - Résistance à la compression des éprouvettes »**, février 2003.
- [NF P18-459]: **NORME FRANÇAISE NF P 18-459 « Béton – Essai pour béton durci – Essai de porosité et de masse volumique »**, mars 2010.
- [NF P18-508]: **NORME FRANÇAISE NF P 18-508 « Additions pour béton hydraulique, additions calcaires: Spécifications et critère de conformités »**, juillet 1995.
- [NF XP P18-545]: **NORME FRANÇAISE NF XP P 18-545 « Granulats – Eléments de définition, conformité et condensation »**, mars 2008.
- [NF P18-404]: **NORME FRANÇAISE NF P 18-404, « Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes »**, AFNOR, décembre 1981.
- [NF EN 13369]: **« Règles communes pour les produits préfabriqués en béton »**, AFNOR, décembre 2004.
- [NT BUILD 492]: **“Concrete, mortar and cement – based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments”**, Approved 1999–11.
- [LCPC,M58]: **Méthode d'essai 58. Caractérisation microstructurales et propriétés relatives à la durabilité : Méthode de mesure et essai de laboratoire**. Edition LCPC, 2001.
- [RILEM - TC107-CSP]: **Recommendations, “Measurement of time-dependent strains of concrete”**, Materials and Structures, vol 31, pp. 507-512, 1998
- [RILEM CPC8]: **Recommendations RILEM CPC8, “Modulus of elasticity of concrete in compression”**, Materials and Structures, Vol. 6, n°30, pp. 404-406, Nov-Dec 1972.
- [RILEM92]: **“Concrete in Hot Climates”**, Proceedings of the Third International Conference held by RILEM, Edited by WALKER M.J.

ANNEXES

ANNEXE 1. CHAPITRE 3 : FORMULATIONS

Compositions	BAP1_20-20	BAP1_20-35	BAP1_50E-20	BAP1_50E-35	BAP1_50SP-20	BAP1_50SP-35
Ciment (CEMI)	292	292	292	292	292	292
Filler calcaire	147	147	147	147	147	147
Superplastifiant	4.385	4.385	4.385	4.385	4.385 + 1.29**	4.385 + 1.29**
Sable (0/4R)	814	814	814	814	814	814
Graviers (4/10R)	895	895	895	895	895	895
Eau gâchage	182.60	182.60	182.6 + 12.4*	182.6 + 13.13*	181.14	181.14

Compositions	BAP2_20-20	BAP2_20-35	BAP2_50E-20	BAP2_50E-35	BAP2_50SP-20	BAP2_50SP-35
Ciment (CEMI)	350	350	350	292	292	292
Filler calcaire	87.5	87.5	87.5	147	147	147
Superplastifiant	4.375	4.375	4.375	4.385	4.375 + 1.47**	4.375 + 1.47**
Sable (0/4R)	808	808	808	814	814	814
Graviers (4/10R)	889	889	889	895	895	895
Eau gâchage	190.3	190.3	190.3 + 12.1*	190.3 + 12.1*	190.3	190.3

Compositions	BAP3_20-20	BAP3_20-35	BAP3_50-20	BAP3_50-35
Ciment (CEMIII)	370	370	370	370
Filler calcaire	92.5	92.5	92.5	92.5
Superplastifiant	4.625	4.625	4.625	4.625
Sable (0/4R)	795.4	795.4	795.4	795.4
Graviers (4/10R)	875	875	875	875
Eau gâchage	187.8	187.8	187.8	187.8

* Ajout d'eau pour maintenir les propriétés autoplâçantes lorsque la température initiale du béton est à 50°C.

** Surdosage en superplastifiant pour maintenir les propriétés autoplâçantes lorsque la température initiale du béton est à 50°C.

ANNEXE 2. CHAPITRE 4 : RESULTATS DE RESISTANCES A LA COMPRESSION (MPa)

Béton	1 jour				7 jours				28 jours			
	Conservation à 20°C		Conservation à 35°C		Conservation à 20°C		Conservation à 35°C		Conservation à 20°C		Conservation à 35°C	
	3 essais	moyenne	3 essais	moyenne	3 essais	moyenne	3 essais	moyenne	3 essais	moyenne	3 essais	moyenne
BAP1_20	10.3	10.5	20.3	20.4	32.9	31.9	30.7	32.3	40.5	41.1	41.2	39.5
	10.6		20.4		32.7		32.4		42.8		39	
	10.6		20.4		30		33.7		40		38.2	
BAP2_20	17.3	17.3	26	26.3	41.1	38.9	38.7	39.4	48.7	45.2	46.1	44.5
	17.1		26.3		36.1		39.7		44.8		40.7	
	17.5		26.6		39.6		39.9		42.1		46.6	
BAP3_20	11.7	11.8	20.2	20.4	38.2	38.3	34.5	35.0	54.2	54.6	50.7	50.0
	11		21.1		38.3		35.4		54.5		49.1	
	12.6		19.8		38.3		34.9		55		50.1	
BAP1_50E	16.9	17.2	25.1	25.2	38.6	38.4	37.0	37.3	46.9	47.1	46.4	47.6
	17.8		25.5		37.9		37.7		46.1		48.7	
	16.8		25.1		38.8		37.1		48.3		47.6	
BAP2_50E	22.1	22.3	18.2	18.1	45.9	45.1	43.4	44.1	55.7	55.2	52.7	53.1
	23.4		17.7		44.1		45.7		55.1		53.3	
	21.4		18.5		45.3		43.3		54.8		53.2	
BAP3_50	10	10.5	23.5	22.7	40.0	39.5	39.3	38.2	55.6	55.6	53.2	54.8
	11		21.9		39.4		37.4		55.8		56.0	
	10.6		22.7		39.0		38.0		55.3		55.2	
BAP1_50SP	18.9	19.0	27.7	28.5	41.9	41.6	47.5	47.3	49.4	49.8	53.8	53.4
	17.8		29.0		41.4		46.4		50.2		53.3	
	20.3		28.9		41.4		48.0		49.9		53.2	
BAP2_50SP	17.1	16.9	28.3	27.8	46.2	46.8	42.8	43.0	56.0	56.4	51.3	50.5
	17.2		27.6		47.7		42.5		57.5		51.2	
	16.3		27.4		47.2		43.7		55.7		49.0	

ANNEXE 3. CHAPITRE 4 : MODULE D'ELASTICITE A 30% DE LA CHARGE A LA COMPRESSION (GPa)

Béton	28 jours			
	Conservation à 20°C		Conservation à 35°C	
	2 essais	moyenne	2 essais	moyenne
BAP1_20	29.8	30.6	29.4	29.2
	31.5		29.1	
BAP2_20	31.4	30.9	28.5	30.1
	30.4		31.6	
BAP3_20	32.0	32.0	33.7	33.7
	32.0			
BAP1_50E	32.6	31.8		
	31.0			
BAP2_50E	29.4	30.1	29.9	29.8
	30.9		29.8	
BAP3_50	32.2	32.1	32.7	32.6
	32.0		32.6	
BAP1_50SP	30.7	31.1	29.8	29.8
	31.5		29.8	
BAP2_50SP	32.1	32.6	35.5	35.8
	33.1		36.2	

ANNEXE 4. CHAPITRE 6 : POROSITE OUVERTE ACCESSIBLE A L'EAU (%)

Béton	35 jours			
	Conservation à 20°C		Conservation à 35°C	
	3 essais	moyenne	3 essais	moyenne
BAP1_20	16.04	15.59	16.54	16.58
	14.95		16.47	
	15.76		16.73	
BAP2_20	15.65	15.22	14.50	14.25
	15.04		14.27	
	14.97		13.97	
BAP3_20	14.29	14.58	15.12	15.27
	14.83		15.16	
	14.63		15.55	
BAP1_50E	15.01	15.30	15.99	16.14
	16.07		16.31	
	14.81		16.11	
BAP2_50E	15.14	14.72	14.66	15.16
	13.91		15.04	
	15.11		15.79	
BAP3_50	15.38	14.39	15.13	14.71
	14.01		14.35	
	13.78		14.65	
BAP1_50SP	13.39	13.49	13.61	13.51
	13.64		13.63	
	13.43		13.30	
BAP2_50SP	13.75	13.32	13.34	13.15
	13.31		13.79	
	12.91		12.31	

ANNEXE 5. CHAPITRE 6 : ABSORPTION D'EAU (%)

Béton	35 jours			
	Conservation à 20°C		Conservation à 35°C	
	4 essais	moyenne	4 essais	moyenne
BAP1_20	5.363	5.548	6.241	5.762
	5.548		5.547	
	5.815		5.364	
	5.465		5.897	
BAP2_20	5.630	5.337	5.546	5.593
	5.571		5.817	
	5.055		5.443	
	5.091		5.566	
BAP3_20	4.950	4.734	5.320	5.012
	4.698		4.893	
	4.646		4.933	
	4.641		4.901	
BAP1_50E	5.634	5.636	5.653	5.683
	5.700		5.688	
	5.616		5.629	
	5.595		5.761	
BAP2_50E	5.268	5.338	5.653	5.543
	5.508		5.507	
	5.294		5.481	
	5.282		5.530	
BAP3_50	5.016	5.053	4.687	4.526
	5.019		4.544	
	5.138		4.252	
	5.039		4.622	
BAP1_50SP	4.989	5.073	4.940	5.056
	5.052		5.160	
	4.983		5.072	
	5.267		5.054	
BAP2_50SP	5.318	5.103	5.024	5.010
	5.041		5.133	
	4.985		4.948	
	5.069		4.934	

ANNEXE 6. CHAPITRE 6 : PERMEABILITE INTRINSEQUE A L'AIR ($10^{-16} \cdot \text{m}^2$)

Béton	35 jours			
	Conservation à 20°C		Conservation à 35°C	
	3 essais	moyenne	3 essais	moyenne
BAP1_20	0.2666	0.2615	0.4369	0.3904
	0.2289		0.3105	
	0.2890		0.4239	
BAP2_20	0.8104	0.8326	0.4851	0.5497
	0.8928		0.6689	
	0.7945		0.4952	
BAP3_20	0.2816	0.3067	0.1293	0.1868
	0.2823		0.2828	
	0.3563		0.1483	
BAP1_50E	0.2314	0.2252	0.1598	0.2758
	0.2129		0.2705	
	0.2313		0.3972	
BAP2_50E	0.3902	0.4336	0.2638	0.2440
	0.3754		0.2461	
	0.5352		0.2221	
BAP3_50	0.3457	0.2347	0.1714	0.2764
	0.2250		0.1305	
	0.1334		0.5274	
BAP1_50SP	0.2005	0.2107	0.1915	0.2268
	0.1978		0.2404	
	0.2337		0.2484	
BAP2_50SP	0.6264	0.3931	0.4039	0.4152
	0.3140		0.5234	
	0.2390		0.3183	

ANNEXE 7. CHAPITRE 6 : PERMEABILITE APPARENTE A L'AIR ($10^{-16} \cdot \text{m}^2$)

Béton	35 jours			
	Conservation à 20°C		Conservation à 35°C	
	3 essais	moyenne	3 essais	moyenne
BAP1_20	1.2884	1.0650	5.0091	3.9221
	1.0276		3.6802	
	0.8789		3.0768	
BAP2_20	5.3437	4.3332	1.1096	0.9948
	4.0717		0.9978	
	3.5843		0.8769	
BAP3_20	6.6193	5.2459	1.7885	1.4334
	5.0140		1.3530	
	4.1044		1.1588	
BAP1_50E	0.8008	0.6748	0.9263	0.7886
	0.6515		0.7778	
	0.5723		0.6617	
BAP2_50E	1.3196	1.1272	0.6444	0.5582
	1.0959		0.5468	
	0.9659		0.4835	
BAP3_50	0.8224	0.6925	0.6504	0.5728
	0.6643		0.5719	
	0.5908		0.4962	
BAP1_50SP	0.7957	0.6685	0.4663	0.4166
	0.6475		0.4161	
	0.5623		0.3674	
BAP2_50SP	3.8807	3.1002	1.5493	1.3000
	2.9003		1.2502	
	2.5196		1.1006	

ANNEXE 8. CHAPITRE 6 : MIGRATION DES IONS CHLORURES ($10^{-12} \cdot \text{m}^2/\text{s}$)

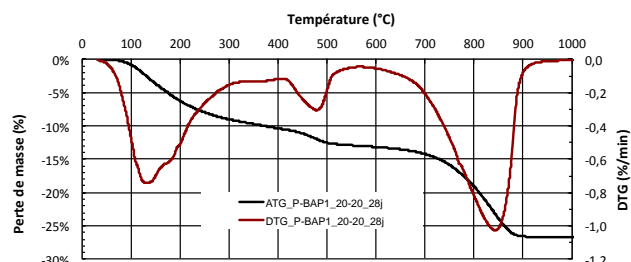
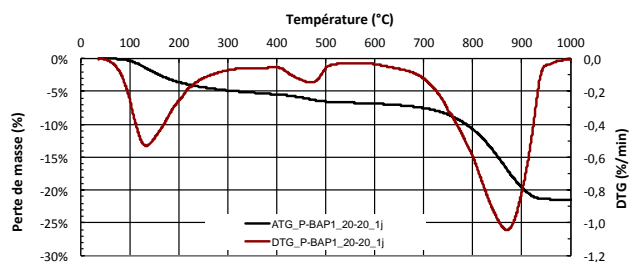
Béton	35 jours			
	Conservation à 20°C		Conservation à 35°C	
	3 essais	moyenne	3 essais	moyenne
BAP1_20	22.2367	21.2988	25.2455	25.4190
	20.5363		25.4590	
	21.1234		25.5524	
BAP2_20	14.7832	15.0307	21.1646	20.7867
	15.2696		20.8553	
	15.0392		20.3403	
BAP3_20	8.3968	8.5846	9.1321	9.0341
	8.7887		8.7397	
	8.5682		9.2303	
BAP1_50E	21.8743	21.9241	28.6245	26.7732
	21.8743		26.1366	
	22.0236		25.5583	
BAP2_50E	14.1985	14.2985	19.2360	19.2867
	14.2735		19.0080	
	14.4236		19.6162	
BAP3_50	7.0078	7.2506	9.9745	9.5656
	7.2505		9.2303	
	7.4935		9.4920	
BAP1_50SP	17.5864	17.9896	21.6734	23.1767
	18.0400		23.2013	
	18.3425		24.6555	
BAP2_50SP	13.2250	13.4246	18.4003	18.4212
	13.2250		19.0840	
	13.8238		17.7794	

ANNEXE 9. CHAPITRE 5 : ANALYSES THERMIQUES

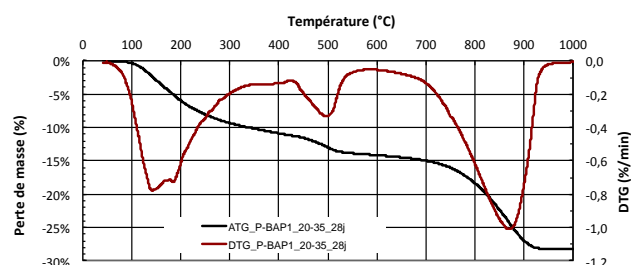
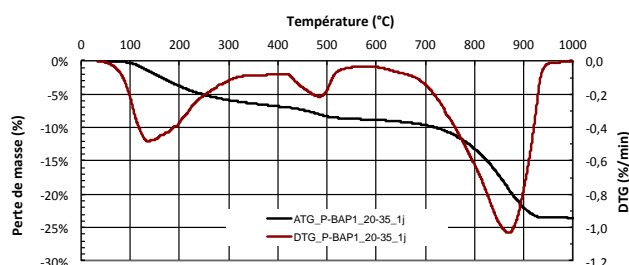
Annexe 9-1 : Les courbes $TG\%=f(T^{\circ}C)$ et $dTG\%/dt=f(T^{\circ}C)$

Pour la pâte de ciment issue de BAP1 (P-BAP1 X°C-YC°)

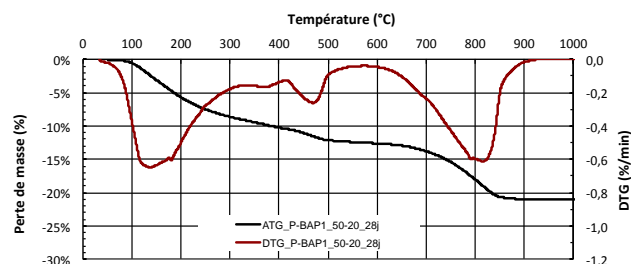
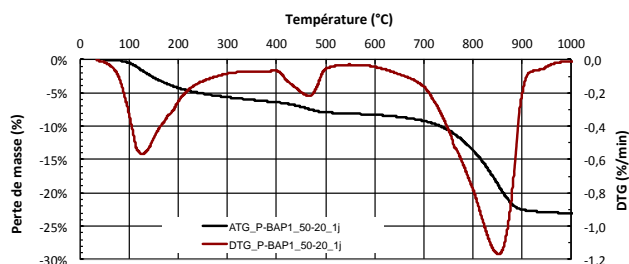
P-BAP1 20-20



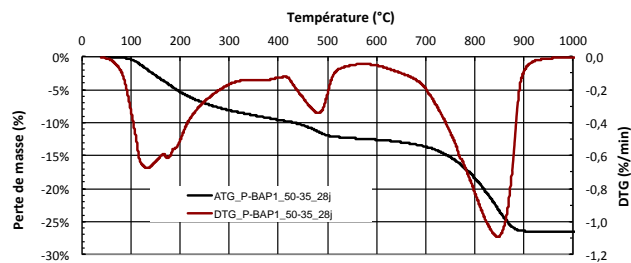
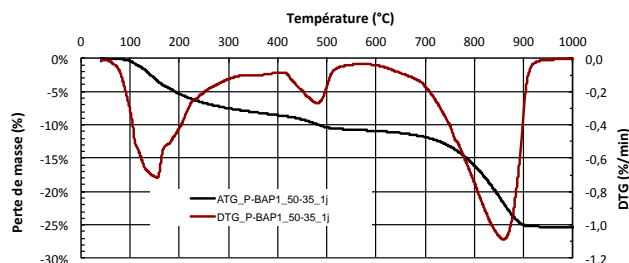
P-BAP1 20-35



P-BAP1 50-20

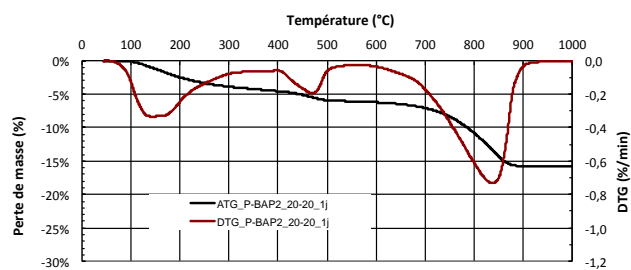


P-BAP1 50-35

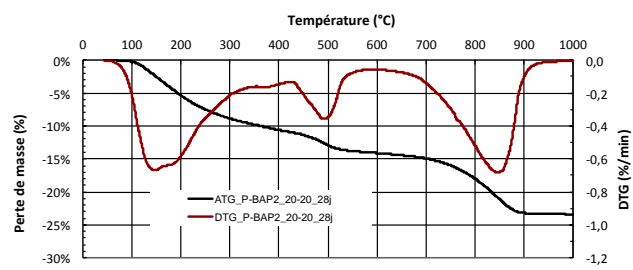


Pour la pâte de ciment issue de BAP2 (P-BAP2 X°C-YC°)

P-BAP2 20-20

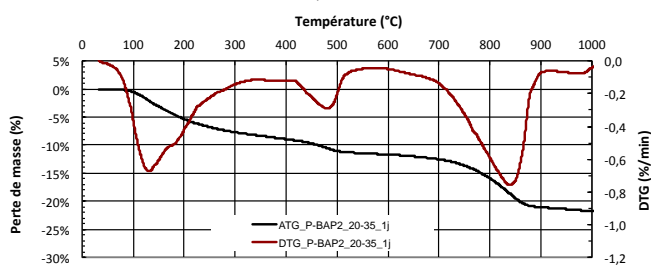


1 jour

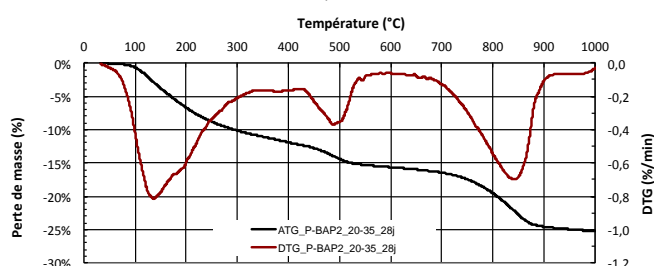


28 jours

P-BAP2 20-35

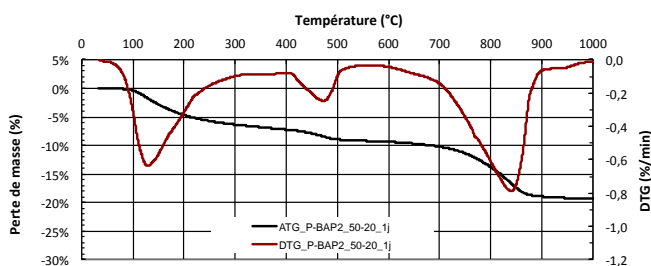


1 jour

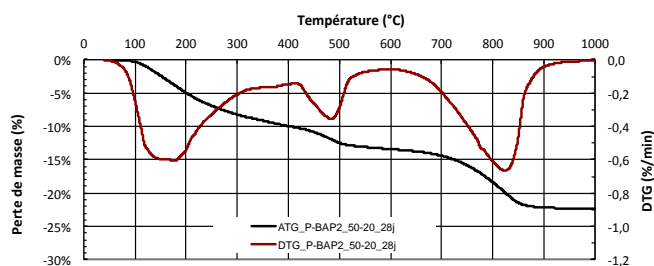


28 jours

P-BAP2 50-20

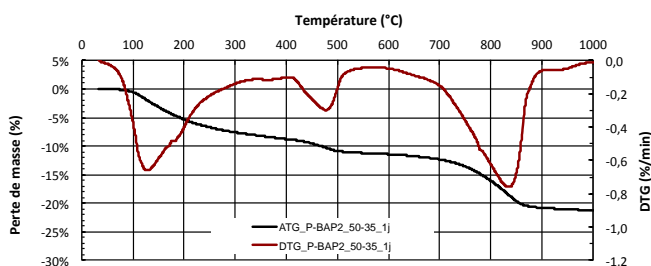


1 jour

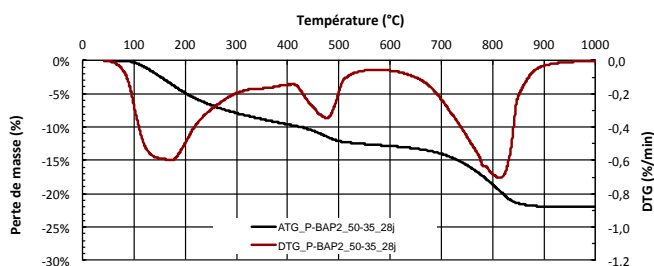


28 jours

P-BAP2 50-35



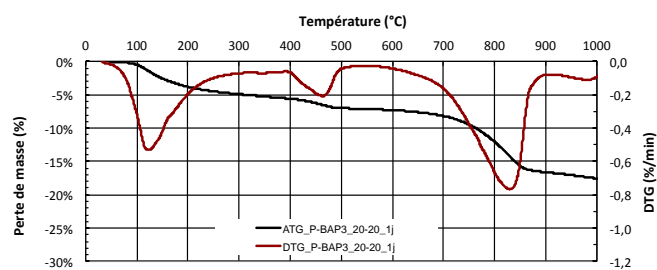
1 jour



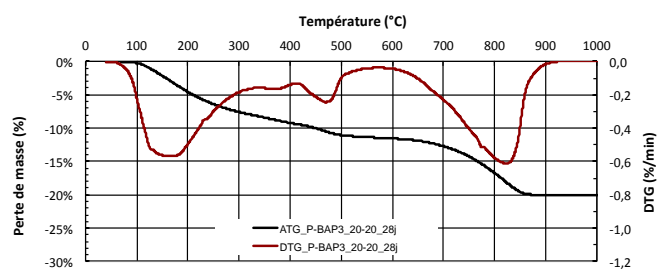
28 jours

Pour la pâte de ciment issue de BAP3 (P-BAP3 X°C-YC°)

P-BAP3 20-20

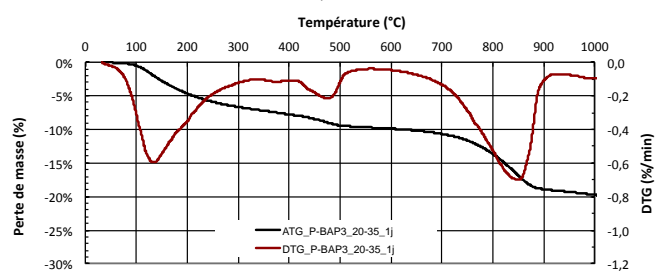


1 jour

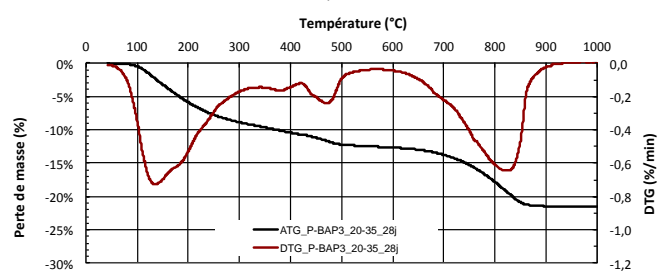


28 jours

P-BAP3 20-35

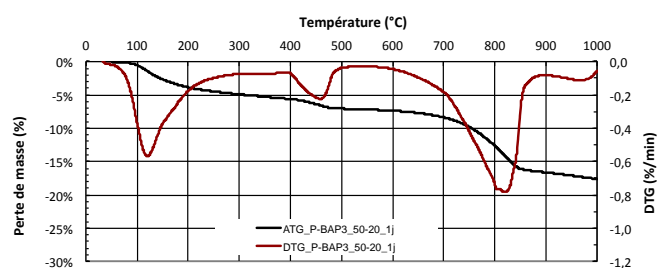


1 jour

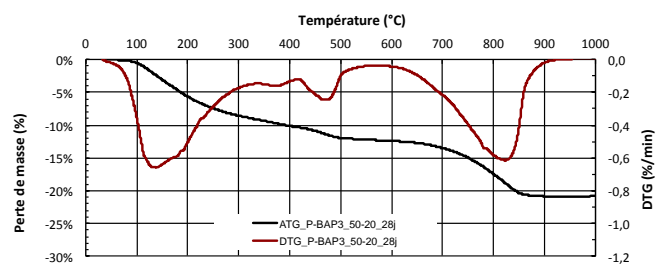


28 jours

P-BAP3 50-20

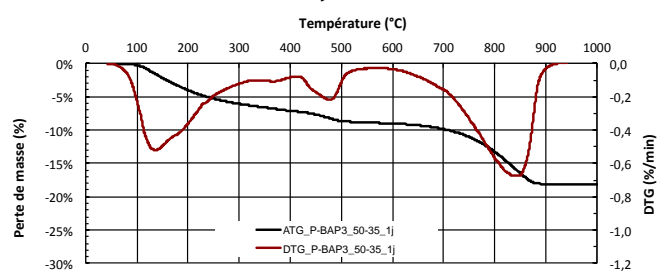


1 jour

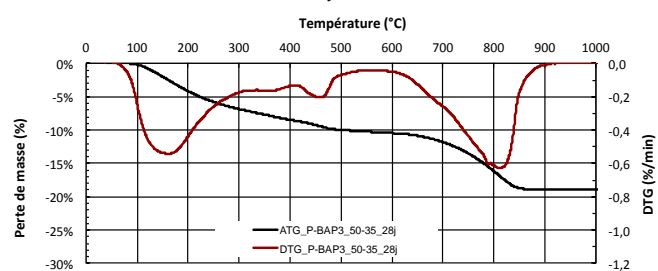


28 jours

P-BAP3 50-35



1 jour



28 jours

Annexe 9-2 : Exploitation quantitatives des courbe d'analyses thermiques.

	nCa(OH)₂[*]	nCaCO₃[*]	Perte de masse 1 ^{**}	Perte de masse 2 ^{***}	q CSH^{****}
P-BAP1 20-20 1j	2,51	29,36	5,26	4,65	35,5
P-BAP1 20-20 28j	5,18	26,86	11,87	10,61	64,1
P-BAP1 20-35 1j	3,99	29,27	8,26	7,29	40,4
P-BAP1 20-35 28j	5,51	27,66	13,38	12,04	71,4
P-BAP1 50-20 1j	3,86	30,18	7,43	6,49	44,9
P-BAP1 50-20 28j	3,74	26,07	11,68	10,77	68,1
P-BAP1 50-35 1j	4,93	29,25	10,10	8,90	64,5
P-BAP1 50-35 28j	5,76	27,64	11,78	10,38	67,5
P-BAP2 20-20 1j	3,58	19,41	5,89	5,02	47,1
P-BAP2 20-20 28j	5,14	17,27	13,43	11,88	63,9
P-BAP2 20-35 1j	4,97	17,30	10,71	9,50	55,1
P-BAP2 20-35 28j	5,71	17,11	12,11	10,72	55,7
P-BAP2 50-20 1j	4,23	18,77	8,63	7,60	47,3
P-BAP2 50-20 28j	6,29	15,84	12,67	12,14	70,2
P-BAP2 50-35 1j	5,39	18,20	10,45	9,14	51,9
P-BAP2 50-35 28j	5,92	15,57	14,43	12,99	70,3
P-BAP3 20-20 1j	3,74	17,07	6,48	5,57	38,0
P-BAP3 20-20 28j	3,12	15,89	11,02	10,26	53,2
P-BAP3 20-35 1j	3,25	16,16	9,02	8,23	46,3
P-BAP3 20-35 28j	3,21	17,80	11,80	11,02	59,3
P-BAP3 50-20 1j	3,82	16,91	6,49	5,56	37,9
P-BAP3 50-20 28j	3,62	16,70	11,51	10,63	57,8
P-BAP3 50-35 1j	3,78	18,59	8,48	7,56	40,6
P-BAP3 50-35 28j	2,01	17,02	9,94	9,45	55,7

* les quantités molaires pour 100g de pâte de ciment (n) sont déterminées par la méthode des tangentes des courbes $TG\% = f(T^\circ)$ sur l'intervalle de températures (450-550) pour la Portlandite et sur l'intervalle de températures (700-900) pour le carbonate de calcium.

** Pourcentage de perte de masse due à la déshydroxylation des hydrates entre 105°C et 400°C, température précédente la décomposition de CH.

*** Pourcentage de perte de masse due à la déshydroxylation des hydrates entre 105°C et 550° (Prise en compte de la décomposition de CH).

**** Quantité relative d'hydrates (CSH, CAH et CASH) déterminée par la méthode de la déconvolution (Chap2.4.5.2).

ANNEXE 10. CHAPITRE 6 : DEFORMATION DE FLUAGE SPECIFIQUE ($10^{-6}\text{m.m}^{-1}.\text{MPa}^{-1}$)

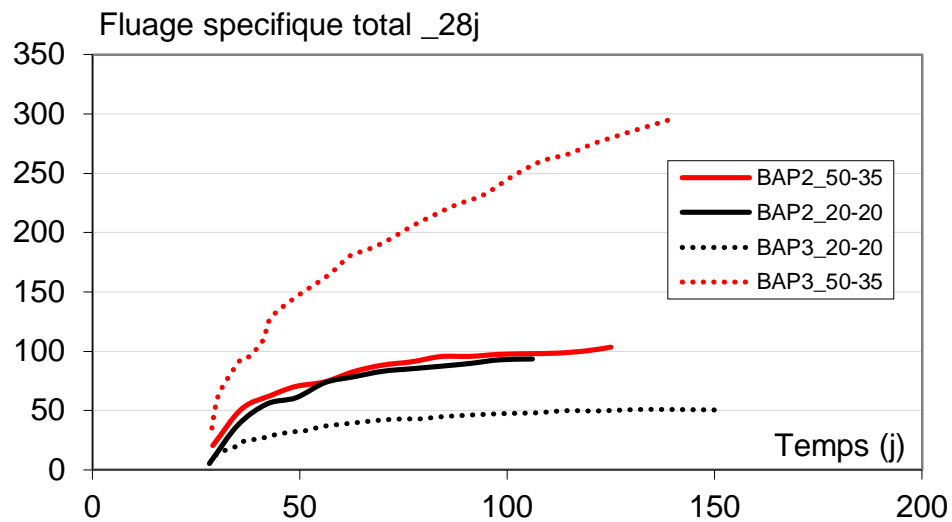


Figure 10a : Evolution du fluage spécifique en mode total pour les BAP étudiés.

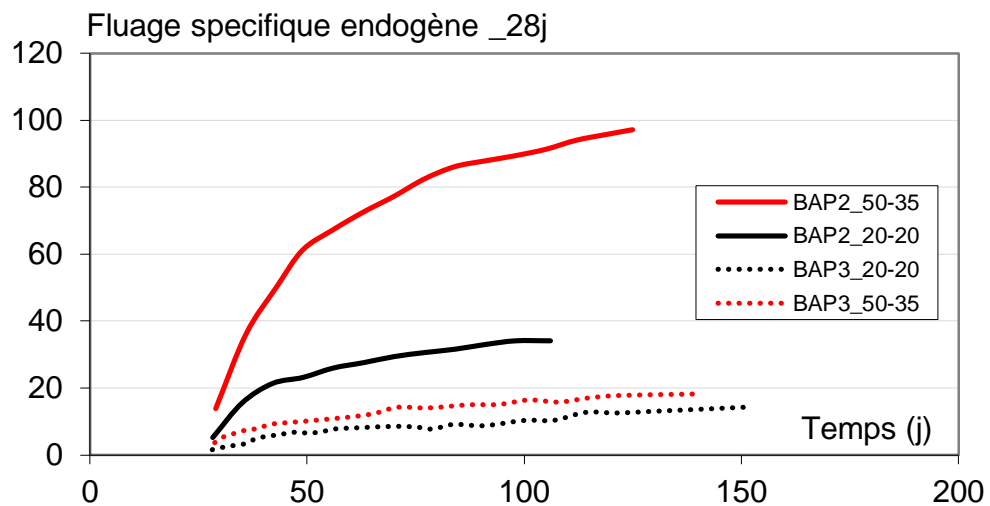


Figure 10b : Evolution du fluage spécifique en mode endogène pour les BAP étudiés.

